

Onderhoud en logistiek

Citation for published version (APA):

Bertrand, J. W. M., Geurts, J. H. J., & Monhemius, W. (1991). *Onderhoud en logistiek*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Onderhoud en logistiek

Op weg naar integrale beheersing

Redactie:

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Dr.ir. J.H.J. Geurts
Prof.ir. W. Monhemius

Auteurs:

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Prof. A.H. Christer
Prof.drs. C. van der Enden
Dr.ir. J.H.J. Geurts
Dr.ir. C.W. Gits
Prof. A.K.S. Jardine
Prof.ir. W. Monhemius
Prof. D.J. Sherwin
Ir. C.H.P. Stal
Prof.dr.ir. J.C. Wortmann

Onderhoud en logistiek

Redactie:

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Dr.ir. J.H.J. Geurts
Prof.ir. W. Monhemius

Auteurs:

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Prof. A.H. Christer
Prof.drs. C. van der Enden
Dr.ir. J.H.J. Geurts
Dr.ir. C.W. Gits
Prof. A.K.S. Jardine
Prof.ir. W. Monhemius
Prof. D.J. Sherwin
Ir. C.H.P. Stal
Prof.dr.ir. J.C. Wortmann



Faculteit Technische Bedrijfskunde

SAMSOM/NIVE

CIP-gegevens

ISBN 90 14 4181 0

NUGI 687

© 1991 TUE, Eindhoven. Lamberti. CS (Eds).

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij Besluit van 23 augustus, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, reader en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient u zich te richten tot: TUE, Eindhoven. Samsom BedrijfsInformatie bv, Postbus 4, 2400 MA Alphen aan den Rijn.

Inhoud

Woord vooraf	XXI
Prof.ir. W.J.M. Geraerds, hoogleraar van 1972 tot 1991	XXIII

DEEL A

Historische ontwikkeling van onderhoudstheorie en onderhoudsbeheersing Verslag van de studiedag 'Onderhoud en Logistiek' Technische Universiteit Eindhoven, 13 september 1991

1. Towards a theory of maintenance

<i>The phenomenon of maintenance</i>	3
<i>The maintenance function within the organisation</i>	4
– <i>The impact of maintenance</i>	4
– <i>Definition of maintenance</i>	5
– <i>Relation of maintenance to production</i>	5
<i>Maintenance as an independent subsystem</i>	6
– <i>Maintenance as a closed system</i>	6
– <i>Maintenance echelon structure</i>	6
<i>Analogies of maintenance and production systems</i>	8
– <i>Fundamentals of maintenance</i>	8
– <i>Analogous diagrams</i>	9
– <i>Production and maintenance</i>	9
– <i>Available versus direct issue</i>	11

– Maintenance planning and production planning	11
– Market	12
– Conclusions	12
<i>Behavior of objects to be maintained</i>	12
– Relevant aspects of behavior	12
– Quantifiable relevant behavioral properties	13
<i>Maintenance conception</i>	18
– Maintenance policies	18
– Behavior of objects to be maintained	20
– Requirements, wishes and constraints from production	28
– Conclusions	33
<i>Inventory control</i>	34
– Typical aspects of inventory of spares	34
<i>Additional aspects</i>	41
– Economics	41
– Multidisciplinary approach	41
– Maintenance and design	41
<i>Towards a theory of maintenance</i>	42
– Conclusion	42
– Recommendation	42
2. Onderhoud in vogelvlucht	45
<i>De werktuigkundige benadering</i>	45
<i>Operations research</i>	46
<i>De Amerikaanse benadering</i>	48
<i>De Britse benadering, Terotechnologie</i>	48
<i>De Japanse benadering, TPM</i>	49
<i>Het TUE-onderhoudsmodel</i>	50
<i>Het TUE-onderzoek</i>	51
<i>Toekomst</i>	53

3. Inleiding tot het thema van de studiedag	56
4. Onderhoud in de praktijk	60
<i>Inleiding</i>	60
– <i>Het bedrijf</i>	60
– <i>De onderhoudsafdeling</i>	62
– <i>De produktieplanning</i>	63
– <i>De onderhoudsplanning</i>	63
– <i>De afstemming tussen onderhoud en produktie</i>	64
<i>Uitdagingen in het onderhoud</i>	64
– <i>De kleine onderhoudsafdeling</i>	64
– <i>Het onderhoud is van secundair belang</i>	64
– <i>De technologische vooruitgang</i>	65
– <i>Meer onderhoudsspecialisten</i>	65
– <i>De kosten van onderhoud</i>	65
– <i>Onderhoud van secundaire produktiemiddelen</i>	65
<i>Hoe groot mag een onderhoudsafdeling zijn?</i>	66
– <i>De samenstelling en variëteit van een onderhoudsafdeling</i>	66
– <i>Het bepalen van de grootte van de onderhoudsdienst</i>	69
– <i>Uitbesteden van het onderhoud</i>	<u>70</u>
5. De invloed van de machine-beschikbaarheid op de beheersing van de tijdigheid en produktievolume	73
<i>Inleiding</i>	73
<i>Een hoog geautomatiseerde produktielijn</i>	75
<i>De produktiebeheersing van de lijn</i>	76
<i>De throughput van de lijn</i>	77
<i>De relatie tussen produktiebeheersing en onderhoudsbeheersing</i>	80
<i>Besluit</i>	<u>81</u>

6. Condition-based optimal replacement of a production system	
<i>Introduction</i>	83
<i>The form of the optimal replacement policy</i>	85
<i>Computation of the optimal policy</i>	86
7. Modelling for control of maintenance for production	
<i>Introduction</i>	90
<i>Maintenance models</i>	92
<i>Data for maintenance modelling</i>	94
<i>Delay time analysis</i>	97
<i>Example Snap-shot modelling</i>	99
<i>Delay time analysis</i>	102
<i>Example of delay-time analysis</i>	105
<i>Plant modification</i>	108
<i>Summary and conclusion</i>	109
8. Possibilities for integration of production and maintenance scheduling and control	
<i>Introduction</i>	112
<i>Literature survey</i>	113
<i>Characteristics of maintenance planning systems</i>	114
<i>Characteristics of systems of production planning and control PPCS</i>	115
<i>Discussion</i>	119

<i>Possibilities for integration with PMS's</i>	120
<i>Conclusions</i>	122
9. Produktiebeheersing en informatietechnologie Ontwikkelingen in perspectief	
<i>Inleiding</i>	125
<i>Produktiebeheersing en informatiesystemen</i>	127
<i>Een classificatie van produktiesituaties</i>	130
– <i>De procesgewijze fabricage</i>	131
– <i>De grootserie / massa-assemblage</i>	131
– <i>De projectgewijze fabricage</i>	132
– <i>De laagvolume componentenfabricage</i>	132
<i>MRP in relatie tot de vier elementaire produktiesituaties</i>	133
– <i>De procesgewijze fabricage</i>	134
– <i>De grootserie / massa-assemblage</i>	134
– <i>De projectgewijze fabricage</i>	135
– <i>De laagvolume componentenfabricage</i>	136
– <i>Discussie</i>	137
<i>Een Bottom-up beschouwing</i>	138
<i>Conclusie</i>	140
10. Beginselen betrouwbaarheidstheorie, betrouwbaarheids- modellen en grafische methoden	
<i>Beginselen betrouwbaarheidstheorie</i>	142
– <i>Structuur- en gebruiksduur afhankelijke betrouwbaarheid</i>	143
– <i>Overlevingskarakteristiek</i>	144
– <i>Kansdichtheid</i>	146
– <i>Storingsgraad</i>	149
<i>Betrouwbaarheidsmodellen</i>	157
– <i>Inleiding</i>	157
– <i>De Weibull verdeling</i>	158

<i>Grafische methoden</i>	167
– <i>Inleiding</i>	167
– <i>De gegevens</i>	168
– <i>De schattingsmethode van Nelson</i>	172
– <i>Complicaties</i>	176
– <i>Samenvatting</i>	180
11. Onderhoudsconcept en onderhoudsbeheersing	
<i>Het onderhoudsconcept</i>	181
<i>Inleiding</i>	181
<i>Onderhoudsconcept</i>	182
<i>Eisen</i>	184
– <i>Effectiviteit</i>	184
– <i>Efficiency</i>	187
– <i>Randvoorwaarden</i>	188
<i>Kader</i>	190
– <i>Het genereren van onderhoudsregels</i>	190
– <i>Het evalueren van onderhoudsregels</i>	196
<i>Slotopmerkingen</i>	197
<i>Onderhoudsbeheersing</i>	
<i>Inleiding</i>	199
<i>Onderhoud</i>	200
<i>Onderhoudsbeheersing</i>	201
– <i>Vraag naar onderhoud</i>	201
– <i>Aanbod aan onderhoud</i>	203
– <i>Doelstelling</i>	204
<i>Onderhoudsbeheersingssysteem</i>	205
<i>Strategische onderhoudsplanning</i>	206
<i>Management onderhoudsbeheersing</i>	208

<i>Operationele onderhoudsbeheersing</i>	208
– <i>Preventief onderhoudsplanning</i>	210
– <i>Correctief onderhoudsclassificatie</i>	211
– <i>Werkorderervrijgave</i>	212
– <i>Werkordercoördinatie</i>	212
– <i>Werkuitgifte</i>	213
<i>Slotopmerkingen</i>	214
12. Onderhoudskosten	
<i>Wat zijn kosten en waar komen ze vandaan</i>	216
<i>Wat is de betekenis van kosten</i>	217
<i>Welke kosten zijn er</i>	219
<i>Welke kosten zijn van belang voor technische- en onderhoudsdiensten</i>	220
<i>De levenscyclus</i>	222
– <i>Verwervingsfase</i>	223
– <i>Gebruiksfase</i>	223
– <i>Liquidatiefase</i>	223
<i>Optimalisatie van onderhoudskosten</i>	224
<i>Kosten in de budgettering</i>	227
<i>Kosten in de rapportering</i>	228
13. Enkele principes uit de conventionele voorraadbeheersing	
<i>De vorm van bestelregels</i>	233
<i>De keuze van de seriegrootte</i>	236
– <i>Standaardgeval</i>	237
– <i>Wisselwerking tussen seriegrootte en veiligheidsvoorraad</i>	239
– <i>Gezamenlijk bestellen bij één leverancier</i>	239
<i>De keuze van de veiligheidsvoorraad</i>	240
<i>Gebruik van speciale tabellen voor bestellen van reserve onderdelen</i>	243

DEEL B

*De bedrijfsdiagnose en oplossing van logistieke problemen bij
productiebeheersing, voorraadbeheersing en onderhoudsbeheersing
in de praktijk*

14. PRODUKTIEBEHEERSING

Inleiding	249
15. Orderproductie in de procesindustrie	251
<i>Bedrijf en opdrachtformulering</i>	251
<i>Het produkt</i>	252
– <i>Normaal polystyreen (PN)</i>	252
– <i>Slagvast polystyreen (PS)</i>	252
<i>Het produktieproces</i>	253
– <i>De goederenstroom</i>	253
– <i>De polymerisatie-afdeling</i>	254
– <i>De extrusie afdeling</i>	256
– <i>De pakkerij</i>	257
<i>Productie- en opslagcapaciteiten</i>	257
<i>Omstel- en voorraadkosten</i>	259
<i>Besturing van de goederenstroom</i>	260
– <i>Productie-besturing</i>	260
– <i>Voorraden en dispositie</i>	261
<i>Knelpunten analyse</i>	262
<i>Het produktiebesturingsconcept</i>	263
<i>Orderproductie in extrusie en pakkerij</i>	265
<i>Productiebesturing in extrusie en pakkerij</i>	266

<i>Productieplanning in de polymerisatie-afdeling</i>	269
– <i>Planning op niveau 1</i>	269
– <i>Planning op niveau 2</i>	270
<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	271
– <i>De extrusie-afdeling</i>	271
– <i>De polymerisatie-afdeling</i>	271
16. Fustopslag en fustuitgifte	
<i>Bedrijfsbeschrijving en opdracht</i>	272
<i>De goederenstroom</i>	272
<i>Analyse van de interne fuststroom</i>	274
– <i>Materiaal classificatie en relatieschema</i>	274
– <i>Opslag- en omslagbehoefte</i>	275
<i>Specificatie van eisen</i>	278
<i>Selectie uit alternatieve oplossingen</i>	280
<i>Uitwerken van de gekozen alternatieven</i>	284
– <i>Het kranenmagazijn</i>	284
– <i>Dynastore</i>	285
– <i>Magazijnindeling</i>	286
<i>Investeringsvoorstel en aanvullende overwegingen</i>	289
17. Sneller leveren door een verbeterde structuur	
<i>Het bedrijf</i>	291
<i>Het produkt</i>	292
<i>Het produktieproces</i>	293
<i>De huidige wijze van goederenstroombesturing</i>	296
<i>Probleemanalyse</i>	297
– <i>Ordervoorbereiding</i>	297
– <i>Productieproces</i>	297

<i>Het klantenorderontkoppelpunt</i>	299
<i>Voorstel goederenstroombesturing vóór het KOOP</i>	300
– <i>Voorraadbeheersing</i>	300
– <i>Doorlooptijd vóór het KOOP</i>	300
– <i>Productieregeling van de Kleine Samenslag</i>	302
<i>Voorstel goederenstroombesturing ná het KOOP</i>	303
– <i>Samenvoegen van bewerkingen</i>	303
– <i>Doorlooptijdverkorting</i>	306
– <i>Uitgifte en in bewerking nemen van productieopdrachten</i>	309
<i>Samenvatting en aanbevelingen</i>	310
18. Een stuklijst-auditsysteem	
<i>Produkt, markt en productieproces</i>	313
<i>Afstudeeropdracht</i>	313
<i>Produktconfiguratie</i>	314
<i>De huidige auditing van configuratiegegevens</i>	317
<i>Knelpunten in de huidige situatie</i>	319
<i>Audit-methoden voor stuklijst-informatie</i>	320
<i>Stuklijstfouten registratie</i>	321
– <i>Experiment centrale stuklijstfoutenregistratie</i>	321
– <i>Stuklijstfouten</i>	322
– <i>Betrouwbaarheid van het experiment</i>	323
<i>Configuratiecheck</i>	323
<i>Het kwaliteitscijfer voor de fabricagestuklijst</i>	325
<i>Een audit systeem voor de fabricagestuklijst</i>	327
– <i>Centrale stuklijstfoutenregistratie</i>	327
– <i>Configuratiecheck</i>	327
– <i>Auditpunten</i>	328
<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	328

19. Het beheersen van kritische delen in de materiaalverwerving	
<i>Inleiding</i>	330
<i>Stuklijstniveaus</i>	331
<i>Materiaalbehoeftebepaling</i>	331
<i>Wijziging van de geplande materiaalbehoefte</i>	333
<i>Analyse van het kritische-delen-bestand</i>	334
– <i>Enquete</i>	334
– <i>Database-analyse</i>	334
– <i>Gesprekken met materiaalplanners</i>	338
<i>Conclusies</i>	339
<i>Oplossingsmodel</i>	340
– <i>Critical parts (CPM)</i>	340
– <i>Simulatie en aanpassing van het model</i>	342
<i>Operationalisatie van het model</i>	344
20. VOORRAADBEHEERSING	
<i>Inleiding</i>	349
21. De systematische indeling van niet repareerbare reservedelen in voorraadbeheersingscategorieën	351
<i>Inleiding</i>	351
<i>Probleemstelling en opdrachtformulering</i>	351
– <i>Het onderhoud van rollend materieel</i>	352
– <i>De voorraadbeheersing ten behoeve van het onderhoud</i>	354
<i>Methode van aanpak</i>	356

<i>Het beslissingsschema beheersingscategorieën</i>	358
– <i>De opzet van het beslissingsschema</i>	358
– <i>De gehanteerde criteria</i>	359
– <i>Beargumentatie van de beslissingsmomenten I</i>	363
– <i>Analyse van het deel van de vraag dat optreedt als gevolg van geplande onderhoudsbeurten</i>	365
– <i>Beargumentatie van de beslissingsmomenten II</i>	366
– <i>De beheersingscategorieën</i>	367
<i>De voor het beslissingsschema benodigde gegevens</i>	368
22. Voorraadbeheersing van risicodelen in de zeescheepvaart	
<i>Inleiding</i>	372
<i>Afstudeeropdracht en aanpak</i>	373
– <i>Lopende onderzoeken op het gebied van voorraadbeheersing van reserve-onderdelen in de zeescheepvaart</i>	373
– <i>De probleemstelling</i>	374
<i>Effectiviteit van de bestaande boordvoorraad</i>	375
<i>De bestaande boordvoorraad</i>	377
<i>Classificatie reserve-onderdelen</i>	382
<i>De risicoschaal</i>	387
– <i>Stand van zaken</i>	388
– <i>Essentialiteit</i>	388
<i>Voorraadbeheersing van risicodelen</i>	390
– <i>Gebruik van de risicoschaal</i>	390
– <i>Financiële consequenties van de risicoklassen</i>	391
– <i>Voorraadopunten</i>	392
– <i>Aanzet tot een beslissingsdiagram</i>	393
– <i>Beslissingsdiagram</i>	394
– <i>De voorraadhoogte en de bestelprocedure</i>	397
– <i>Reacties van de rederijen</i>	398
– <i>Eisen van de classificatiebureau's</i>	400
<i>Economische aspecten van het onderzoek</i>	400
– <i>Besparingen op initiële voorraad</i>	400

<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	402
– <i>Conclusies</i>	402
– <i>Aanbevelingen</i>	402
23. Het voorspellen van de vraag naar reserve onderdelen voor vliegtuigen	
<i>De situatie</i>	405
<i>Voorspellingen op basis van elementen van de planning</i>	407
<i>De steekproef</i>	410
<i>Analyse van correlaties en vertragingen</i>	414
– <i>Verschillen tussen bases</i>	415
– <i>Multiple correlatie</i>	415
– <i>De vijf parameter klasse indeling</i>	415
– <i>Het voorspellen van de correlatie 'vliegunen - vraag'</i>	416
<i>Verwachte correlaties</i>	417
<i>Extrapoleren of voorspellen ?</i>	418
– <i>Voorspellingsmethoden</i>	418
– <i>Extrapolatiemethoden</i>	419
– <i>Conclusie</i>	421
24. Beheren van voorraden reserveonderdelen	
<i>De doelstelling van METRIC</i>	425
<i>Goederen- en informatiestroom</i>	426
<i>Criteria</i>	427
– <i>Vergelijking van, en keuze uit criteria</i>	427
<i>Vooronderstellingen van het model</i>	428
<i>Opbouw van het model</i>	430
– <i>De vraag</i>	430
– <i>Het opstellen van de doelfunctie</i>	431
– <i>Systeemvergelijkingen</i>	433

<i>Formulering mathematisch programmeermodel</i>	434
<i>Oplossing mathematisch programmeermodel</i>	434
<i>Uitwerking van de doelstellingen van METRIC met behulp van methode II</i>	434
<i>Analyse van de praktische bruikbaarheid van het model</i>	435
<i>Gevoeligheidsanalyse</i>	436
<i>Analyse praktische bruikbaarheid METRIC</i>	436
25. ONDERHOUDSBEHEERSING	
Inleiding	441
26. Het ontwerpen van het onderhoudsconcept; een toepassing bij Mora Snacks	
<i>Inleiding</i>	443
<i>Technisch systeem analyse</i>	446
<i>Bedrijfsanalyse</i>	449
<i>Het initiëren van onderhoud</i>	450
<i>Het operationaliseren van onderhoud</i>	453
<i>Het limiteren van onderhouds-intervallen</i>	454
<i>Het clusteren van onderhouds-operaties</i>	456
<i>Het harmoniseren van onderhoudsintervallen</i>	460
<i>Het groeperen van onderhouds-operaties</i>	461
<i>Het evalueren van onderhouds-regels</i>	463
<i>Slotopmerkingen</i>	465

27. Invoering van een storingsregistratiesysteem

<i>Inleiding</i>	466
– <i>Het bedrijf</i>	466
– <i>Het fabricage proces</i>	467
– <i>De onderhouds-organisatie</i>	468
 <i>De onderzoeksprobleemstelling</i>	 469
 <i>Analyse van de (onderzoeks)probleemstelling</i>	 470
 <i>De onderzoeks-aanpak</i>	 471
 <i>De opzet van het storingsregistratie-systeem</i>	 472
– <i>De informatiebehoefte</i>	472
– <i>De rotatiedelen-geleidekaart</i>	475
 <i>Eerste resultaten van de storingsanalyse</i>	 477
 <i>Conclusie</i>	 483

28. Aanzet tot informatie-analyse van het onderhoudsconcept

<i>Aanleiding van het onderzoek</i>	485
 <i>Opdrachtformulering en onderzoeksmethode</i>	 486
– <i>Opdrachtformulering</i>	486
– <i>Operationalisatie van de opdracht</i>	486
– <i>Toelichting bij het stappenplan</i>	487
 <i>Vergelijking huidige methode met het gedecomposeerde ontwerp kader voor het onderhoudsconcept</i>	 489
 <i>Vergelijking van Teroman met het gecomponeerde ontwerp kader voor het onderhoudsconcept</i>	 497
 <i>Conclusies</i>	 500
– <i>Conclusies ten aanzien van de vergelijking tussen DSM-methode en ontwerp kader</i>	500
– <i>Conclusies ten aanzien van de vergelijking tussen Teroman en ontwerp kader</i>	501

29. Optimaliseren van integrale onderhoudsafhankelijk kosten

<i>Inleiding</i>	503
<i>Factoren die de onderhoudsafhankelijke kosten bepalen</i>	504
<i>De procedure</i>	505
– <i>Toelichting op de procedure</i>	
<i>Voorwaarden met betrekking tot de procedures</i>	508
<i>Voorwaarden met betrekking tot</i>	
– <i>de analyse software</i>	508
– <i>het storingsmeldsysteem</i>	509
– <i>de installatiecodering</i>	510
– <i>de organisatie</i>	511
– <i>het werkstroombeheersingssysteem</i>	511
– <i>de performancemeting</i>	512
<i>Conclusie</i>	514

30. Onderhoudsbewust ontwerpen

<i>Inleiding en opdrachtformulering</i>	515
– <i>Aanpak</i>	517
– <i>Definitieve opdrachtformulering</i>	518
<i>Werkwijze</i>	519
– <i>Inleiding</i>	521
– <i>Opstellen storingsboom</i>	521
– <i>Bepalen van oplossingen voor storingen</i>	525
– <i>Onderzoeken van combinaties van oplossingen</i>	531
<i>Een toepassing</i>	532
– <i>Inleiding</i>	532
– <i>Korte beschrijving hydraulische feederpenaandrijving</i>	532
– <i>Specificaties van onderhoudsregels</i>	532
– <i>Storingsboom</i>	534
– <i>Oplossingen voor storingen</i>	535
– <i>Combinaties van oplossingen</i>	536
– <i>Slotopmerkingen</i>	537
<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	537

Woord vooraf

Het boek dat voor u ligt is tot stand gekomen naar aanleiding van het afscheid van prof.ir. W.M.J. Geraerds van het hoogleraarsambt aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Vanuit zijn leerstoel is gedurende de afgelopen decennia de basis gelegd voor de pragmatische aanpak rond het theorievormend onderzoek en de gebieden Onderhoudsbeheersing en Productiebeheersing aan de faculteit Technische Bedrijfskunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Dit vindt zijn weerslag in de studiedag die op 13 September 1991 plaats vond, de dag waarop Geraerds zijn uitreerede hield, en in de inhoud van dit boek.

Een overzicht van de bijdragen van Geraerds aan zijn vakgebied vindt u in het volgende hoofdstuk van de hand van prof.ir. W. Monhemius, zijn collega gedurende al die jaren.

Het boek bestaat uit twee delen.

Het eerste deel is gegroepeerd rondom de voordrachten die zijn gehouden tijdens bovengenoemde studiedag. De lezingen hebben alle betrekking op het vakgebied Onderhoudsbeheersing en de relatie tussen Onderhoudsbeheersing en Productiebeheersing, en geven de visie weer van een deels internationaal gezelschap auteurs op dit gebied.

Het wordt ingeleid door de fundamentele beschouwing over onderhoudstheorie, 'Towards a theory of Maintenance', die Prof. Geraerds reeds in 1970 publiceerde, en door een deel van zijn uitreerede, 21 jaar later.

Ook staan in dit deel een aantal beginselartikelen over onderwerpen die tot de fundamentele behoren van de Onderhoudsbeheersing, van de hand van auteurs van de vakgroep KBS van de Faculteit Technische Bedrijfskunde, die voor het merendeel komen uit de 'school van Geraerds'.

Het tweede deel bevat artikelen van een meer illustratieve aard over toepassingen in de praktijk en bestaat uit drie verzamelingen geselecteerde artikelen, die alle afgeleid zijn van afstudeer-onderzoek in de vakgroep KBS.

Het eerste subdeel bevat een viertal artikelen door Bertrand geselecteerd op het gebied Produktiebeheersing, het tweede subdeel bevat vier, door Monhemius geselecteerde artikelen op het gebied Voorraadbeheersing, het derde subdeel tenslotte bevat vijf door Gits geselecteerde artikelen op het gebied Onderhoudsbeheersing.

Zij geven een gevarieerd beeld van werk dat in industriële situaties is uitgevoerd, onder de min of meer directe invloed van ideeën van Geraerds en zijn 'school'.

Dit boek is tot stand gekomen dankzij de inspanningen van E. Lamberti, oud-docent van de vakgroep KBS van de Faculteit Technische Bedrijfskunde, die zich heeft belast met het samenstellen, eindredactie en persklaarmaken van alle manuscripten, het verwerken van teksten en het invoeren van tekeningen en tabellen daarbij kundig bijgestaan door mevrouw A. Kirkels van Steen en de heren P. Doorakkers en J. van Knippenbergh van de Faculteit Technische Bedrijfskunde.

Eindhoven, voorjaar 1991

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Dr.ir. J.H.J. Geurts
Prof.ir. W. Monhemius.

Prof.ir. W.M.J.Geraerds, hoogleraar van 1972 tot 1991

Na zijn officiersopleiding vervulde Will Geraerds verschillende functies bij de Koninklijke Luchtmacht in staf- en lijnposities. Van 1957 tot 1961 studeerde hij aan de (toen geheten) Technische Hogeschool te Delft; in 1961 werd hem het diploma werktuigbouwkundig ingenieur met lof uitgereikt. Zijn afstudeer richting was werkplaatstechniek, organisatorisch. Tijdens zijn afstudeeropdracht bij Hanomag (Hannover) werden, met succes, verbeterde systemen voor productie-beheersing door hem ontwikkeld en ten dele reeds ingevoerd.

Tussen 1961 en 1971 vervulde ir. W. Geraerds bij de Luchtmacht achtereenvolgens de functies van Chef Technische Dienst bij de Centrale Onderhoudswerkplaats DATIM te Soesterberg, Hoofd Sectie Mechanische Gronduitrusting en Hoofd Stafsectie Bedrijfsvoering van het Directoraat Materieel te Den Haag. In 1971 kreeg hij op eigen verzoek eervol ontslag als luitenantkolonel. Hij werd toen adjunct-directeur bij Fokker voor de Sector Organisatie en Automatisering.

Naast deze zware functies vervulde Geraerds vanaf 1965 ook, en met veel inzet, de functie van deeltijds wetenschappelijk medewerker (een dag per week) bij de afdeling Bedrijfskunde in oprichting van de (toen geheten) Technische Hogeschool Eindhoven. Zijn wetenschappelijke inbreng vanuit de concrete praktijk was bij de start van de bedrijfskundige ingenieursopleiding zeer welkom, met name bij het opzetten van praktijkoefeningen en bij het begeleiden van eindopdrachten.

Na het overlijden van professor ir.J.Nabben werd ir. W.Geraerds in 1972 benoemd als zijn opvolger; hij werd daarmee 'gewoon hoogleraar' in de bedrijfskunde, in het bijzonder in de productieplanning en -besturing.

Professor Geraerds heeft van 1972 tot 1991 zeer vele taken verricht en vele bijkomende functies vervuld; het is onmogelijk deze allemaal hier te vermelden. De belangrijkste ervan zullen hierna aandacht krijgen in een beschouwing van ach-

tereenvolgens de werkzaamheden op het gebied van onderwijs, onderzoek, bestuur en beheer.

Geraerds heeft de colleges op het gebied van produktiebeheersing en onderhoudsbeheersing opgezet en ontwikkeld; latere ontwikkeling geschiedde onder zijn aanvoering. Hij heeft bij de begeleiding van zeer vele afstudeerders een rol gespeeld; hij deed dat op een stimulerende en enthousiasmerende wijze. Zijn bijdragen bleven niet beperkt tot Eindhoven alleen; hij droeg bij aan onder andere het onderwijs in Tilburg (als vervanger van professor Nielen tijdens diens rectoraat), in Manchester (als External Msc and Ph.D. Examiner en als Honorary Visiting Professor of Terotechnology) en in landen van het Nabije en Verre Oosten door gastvoordrachten. In Nederland werden vele cursussen gegeven. De Leergang Bedrijfskunde, onder auspiciën van de Kamer van Koophandel Eindhoven ontving doeltreffende steun.

Baanbrekend werk heeft Geraerds verricht op het gebied van ontwikkelen en uitdragen van theorie op het gebied van onderhoudsbeheersing. Sinds 1970 is hij de leider van het onderzoeksproject met die naam.

Wetenschappelijke hoofdmomenten waren daarbij zijn voordrachten in 1970 (NATO-Conferentie in Luxemburg: 'Towards a theory of maintenance') en in 1988 (Diesrede te Eindhoven: 'Onderhoud vanuit bedrijfskundig perspectief'; presentatie van het TUE-onderhoudsmodel). In dit verband moet stellig het werk worden genoemd van twee van zijn promovendi: C.W. Gits in 1984 ('On the maintenance concept for a technical system; a framework for design') en J.H.J. Geurts in 1986 ('On the selection of elementary maintenance rules').

Professor Geraerds heeft door zijn vaktechnische inbreng, gecombineerd met zijn krachtig stimulerende bestuurlijke inbreng veel bijgedragen aan de verspreiding en toepassing van onderzoeksresultaten, zowel nationaal (NVDO, tijdschriften van NEVEM, het Handboek Onderhoudsmanagement en, zoals reeds vermeld, vele cursussen) als internationaal (IFRIM, Editor 'Terotechnica', 'Maintenance Management International' en later Editor Maintenance Management in 'Engineering costs and production economics').

Op een ander gedeelte van het vakgebied zij vermeld, last but not least, de promotie op één gezamenlijk proefschrift van Bertrand en Wortmann bij Geraerds als eerste promotor in 1981 ('Production control and information systems for component manufacturing shops', Elsevier Scientific Publishing Company). Thans zijn beiden op hun beurt als hoogleraar actief, en wel in de vakgroepen KBS en BISA van de Eindhovense faculteit Technische Bedrijfskunde.

Het aangevangen werk zal dus worden voortgezet; de wagen op gang gebracht, wordt door anderen verder getrokken.

Algemeen bestuurlijk werk heeft Will Geraerds nooit ontlopen. Binnen de universiteit was hij, onder andere, decaan van de afdeling Bedrijfskunde van 1979 tot 1982, voorzitter van een 'commissie van goede diensten', voorzitter van de vakgroep KBS.

Ook nationaal en internationaal verrichtte hij bestuurlijk werk binnen NEVEM, NVDO, KIVI, EFNMS, IFRIM.

Van 1971 tot 1986 was hij voorzitter van de NVDO (Nederlandse Vereniging voor Doelmatig Onderhoud) in welke periode door middel van vele congressen, rapporten en cursussen het onderhoud in Nederland tot erkenning kwam. In 1970 nam hij het initiatief tot de oprichting van de European Federation of National Maintenance Societies, waarmee een reeks tweejaarlijkse Europese congressen werd ingeluid. In 1986 richtte hij de stichting IFRIM (International Foundation for Research in Maintenance) op, waarin wetenschappelijke onderzoekers op onderhoudsgebied wereldwijd samenwerken.

In zijn bestuurlijk werk was hij steeds een krachtig pleitbezorger voor de belangen van studenten, jonge onderzoekers en de medewerkers in de technische en administratieve sfeer. Zo hadden bijvoorbeeld tijdens zijn decanaat, de evaluatie van het onderwijs en de studiebegeleiding sterk zijn aandacht.

Ook de studievereniging Industria heeft vele malen zijn enthousiaste ondersteuning gekregen, vooral bij het opzetten van (nationale en internationale) studiereizen.

Geraerds werkte integer, snel, maar waar nodig met geduld; hij deed zijn werk vanuit hoge ethische opvattingen en verwachtte die ook bij anderen. Vaak wist hij in zijn omgeving een krachtige 'esprit de corps' te kweken. Het huis van hem en zijn echtgenote stond open voor collega's uit alle landen, medewerkers en studenten.

Professor ir. W. M. J. Geraerds heeft zijn werk als hoogleraar van 1972 tot 1991 verricht met grote deskundigheid, de hoogst mogelijke inzet en grote daadkracht.

Eindhoven

Prof.ir. W. Monhemius.

DEEL A

HISTORISCHE ONTWIKKELING VAN ONDERHOUDSBEHEERSING

Towards a theory of maintenance

Prof.ir. W.J.M. Geraerds

1

1. The phenomenon of maintenance

Since the early days of mankind man has used tools. They served as a means of extension of the capabilities of the human body in processes like winning raw material in nature, growing and harvesting, building a dwelling, bridges and canoes and hunting animals or each other.

Along with the use of tools went the experience that they showed a decline in suitability through wear and tear, while sometimes sudden breakdown appeared. One way to meet this situation was the manufacturing or procurement of a new tool as a replacement of the unsound one. In many a case, however, the unsound tool could be restored to its serviceable state. Though not familiar with today's economic criteria, experience showed that the effort and the time for this restorative process were often considerably smaller than the process of replacing the tool. Thus repair was born. Also it was discovered that sometimes the breakdown and the damage resulting from the age and the use of the tools could be prevented or reduced if attention was paid to their state during the period in which they still fulfilled their function. This is what we call preventive maintenance nowadays.

Observing the development through the ages, we find an increase in the number of tools and of their complexity, especially in the last decades, where we see that large and complex systems are designed, manufactured and put into operation in record time. Though a vast amount of scientific knowledge and of experience is included in such systems, deterioration and breakdown does not appear. This is partially due to the fact that all materials show deterioration by aging and by use. This is partially due to the fact that there is, in the continuous process of development of new systems, insufficient knowledge, at the time of design and manufac-

turing, of an economically justifiable way by which deterioration and breakdown can be postponed to the time that a system is obsolete.

This means that it is unthinkable that maintenance as such will ever become superfluous by elimination of its causes. To meet the maintenance task efficiently it is therefore necessary to direct the attention to the way in which maintenance should be organized and to the way in which the properties relevant to the maintenance task can be influenced.

2. The maintenance function within the organization

– The impact of maintenance

Little is known about the magnitude of maintenance in the organization. A detailed inquiry by means of a questionnaire was made by Mr. E. Turban¹, covering 309 valid answers out of the addressed 770 medium- to large-size plants across the USA. The results show that the trend over the years 1958 – 1965 is a decrease in the number of maintenance men per 100 production workers and of the repair time per work order, an increase in the time period between serious breakdowns, but a rise in the cost per serious breakdown. Maintenance costs as a percentage of total manufacturing costs vary between 10.2% for process plants and 6.3% for non-process plants, averaging 8.2%. Figures in consumption – rather than production – organizations, like military organizations, show quite a different picture, probably owing to early introduction of new discoveries and operations close to performance limits. The British Navy, for example, allocates 40% of its 1967 – 1968 vote to upkeep². The RAF shows the same impact of maintenance on its total Defence Budget: £200m out of £500m. The amount of money spent on new equipment is equal to the amount of money spent on maintenance³. These figures can be taken as characteristic of military organizations.

In both industrial and military organizations, the equipment in use has become much more expensive over the last decades. This went along with increase in size, complexity and performance. The – not quantified – aspect that is gaining importance is the loss of production capacity caused by down time, in particular the unexpected down time, of the equipment in use. To cope with this growing maintenance task, a need exists for a comprehensive theory of maintenance, which would serve as a guide in organizing maintenance within an organization and in indicating areas requiring research.

– *Definition of maintenance*

The literature shows a variety of definitions of maintenance, which is not unusual in managerial subjects. In order to prevent ambiguity, it is necessary to define maintenance as it is understood in this paper. In an attempt to arrive at an all encompassing theoretical structure of maintenance, the approach must be based on the goals to be reached by maintenance. This means that maintenance cannot be characterized in terms of organizational departments, job descriptions, responsibilities and similar notions taken from the static, hierarchical approach of organizations.

If objectives are to be achieved by having things happen, the attention has to be focussed on the collection of processes that lead to the realization of the objectives and, in particular, on the way in which the output of these processes can be influenced. This point of view, derived from the systems theory approach to organizations, leads to the following definition, which includes the goal element and the process element:

Maintenance is the total of activities serving the purpose of retaining the production means in or restoring them to the state that is considered necessary for fulfilment of their production function⁴.

It should be noticed that this definition implies repair: ‘restoring to’ corresponds to corrective maintenance and ‘retaining in’ corresponds to preventive maintenance. The definition does not imply that maintenance is efficient. Whether maintenance in a given case is efficient or inefficient is dependent on the ‘considering’, which depends on the criterion applied for the evaluation of the efficiency.

– *Relation of maintenance to production*

The production function manifests itself materially in the products that are manufactured. It is because of the use of means of production that maintenance is necessary, and consequently the costs of maintenance are to be attributed to the costs of the products manufactured. Optimization of maintenance must therefore be found in criteria which directly or indirectly minimize the cost of the products. This means that maintenance exists only by virtue of the fact that its function is derived from the the production function by supplying its output to the production function. Seen in this way, it is possible to detach maintenance from the total systems of the organization and study it as a more or less independent subsystem (fig. 1).

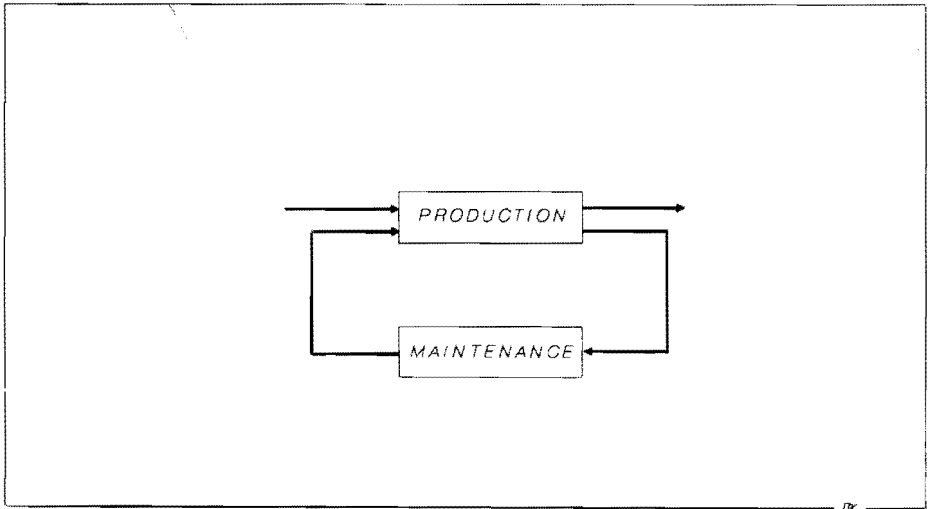


Figure 1. Relation between production and maintenance functions

3. Maintenance as an independent subsystem

– *Maintenance as a closed system*

In the simplified diagram in fig. 2 the maintenance process is characterized by the change in states that units to be maintained undergo, starting from the state of operational use and returning to this state. In order to fulfil the task set by production, it is necessary to control this flow of units through the maintenance phases. By situating production in this flow-diagram as shown, the interrelated behavior of maintenance and production can be detailed further.

– *Maintenance echelon structure*

The execution of maintenance is by nature technological and asks for facilities and skills, capable of covering the diversity of objects to be maintained. Specialization leads to centralization for different levels of work, usually called echelons, including the appropriate facilities and manpower for each level.

The units in use in an organization have a certain useful lifetime, after which they are replaced by identical units, or by more or less similar units according to the operational requirements and to the state of art of design at that time.

This renewal process is continuous, though implying in some cases a rather radical operation, like the introduction of a new weapon system together with the phasing out of the one to be replaced.

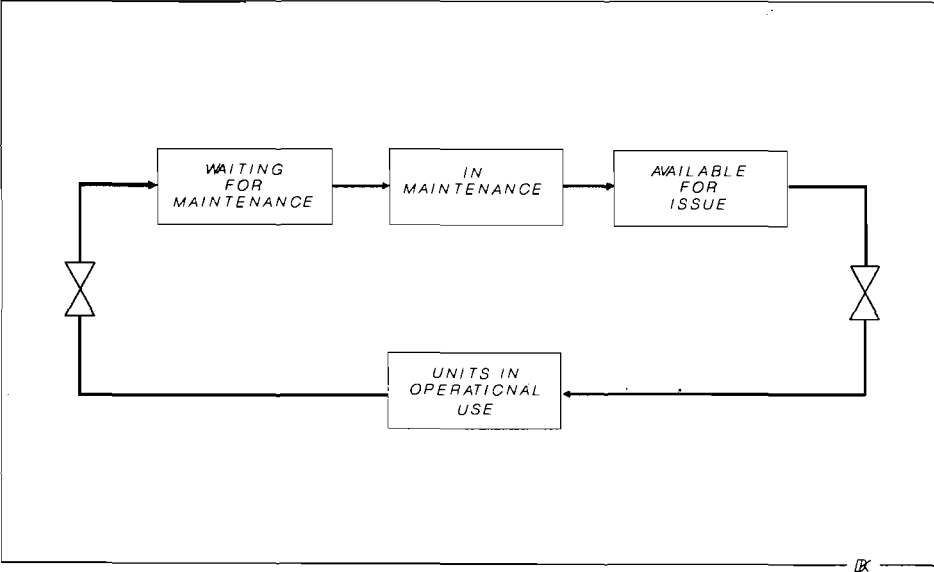


Figure 2. Maintenance as a closed system

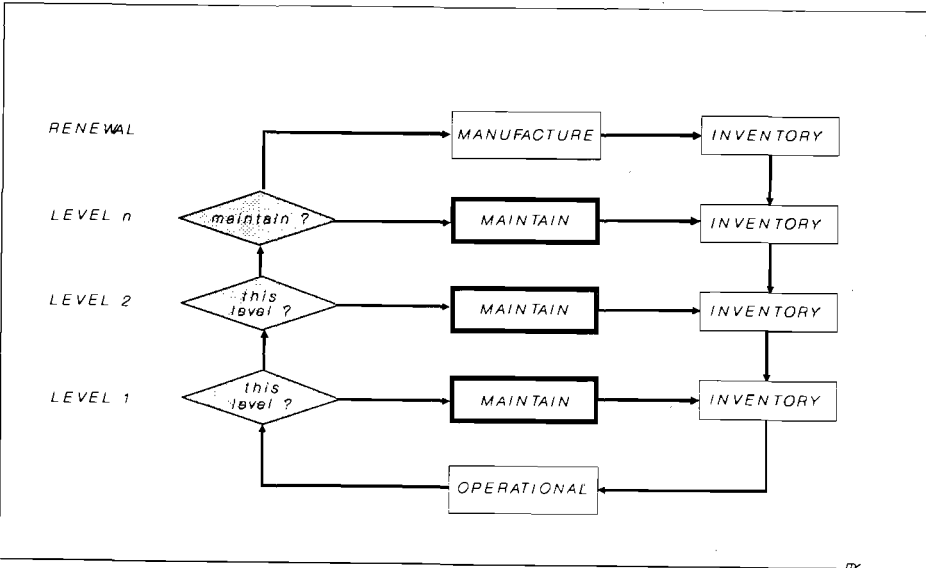


Figure 3. Maintenance echelon structure

The more permanent nature of the echelonized capacity exists at the times that new objects to be maintained enter the organization. The capacities in the maintenance echelon structure, given in figure 3 will then have to be adjusted to the requirements of the new objects. The left part of this figure represents the decision-rules for the selection of the maintenance level, controlling the actual flow of an object to the levels to be considered. If maintenance is not possible or not efficient renewal takes place by purchase. Contract maintenance is included in the structure as it is regarded as a capacity available for selection. The total behavioral content of this structure is too large for direct theoretical development That will be done by looking closer at the elementary maintenance loop in figure 2.

4. Analogies of maintenance and production systems

– *Fundamentals of maintenance*

An essential condition to arrive at control of a process is quantitative prediction and measurement. A tremendous amount of scientific work has been devoted to quantitative models for a large diversity of problems, often valid for more situations than those that originated the research. To prevent the superfluous effort of reinventing the wheel, theoretical elements already developed should be traced as far as they fit in logically. If we look at maintenance activities for that purpose, the following facts are noticed.

In the end maintenance consists of technological treatment of physical objects. In order to realize that, the work to be done must be assigned to the appropriate capacities. As capacities are scarce, there will be more than one job competing for assignment to the capacity. The theory that covers this assignment problem is known as the theory of *scheduling*. The resulting reservation of capacity is known as *loading*. To be able to schedule the work to be done, it should be prepared and presented in a shape that is adjusted to the scheduling process. This is known as *processplanning*⁵.

The capacity being called upon cannot be expected to be more or less according to the requirements if the qualitative and quantitative dimensions have not been predicted and adjusted accordingly in due time. This process is known as *long-term* and *mid-term planning*.

These fundamental maintenance activities clearly show far-reaching analogies with fundamental production activities, calling for a more systematic comparison of the maintenance process and the production process.

– *Analogous diagrams*

To arrive at a more detailed comparison of maintenance and production the production process and the maintenance process are represented by a flow diagram in figure 4.

The suggestion – coupled with analogous diagrams – that behavior is identical, requires a comparison of the contents of the respective blocks in the diagrams, so as to distinguish between identical and non-identical behavioral aspects.

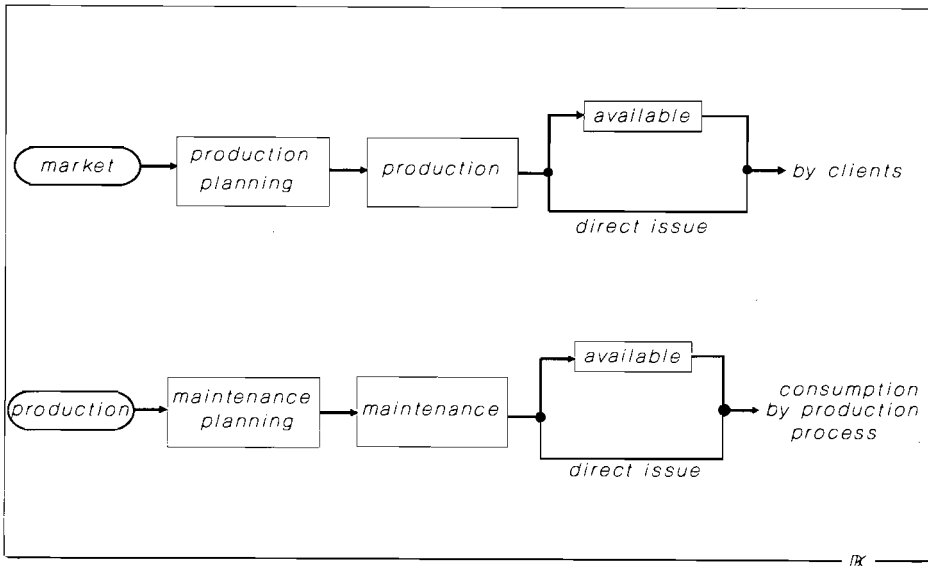


Figure 4. Analogous flow diagrams of production and maintenance

– *Production and maintenance*

The assignment of work

At lower levels of maintenance, the assignment of work concerns logically more diverse work than that which is done at higher levels, which is more specialized. The work at the lower levels shows the combination of diversity of work and universality in the capacities – in particular, in the skills. The majority of scheduling problems at these lower levels are therefore analogous to those in the job shop. From research in this field, done by Conway and Maxwell^{6, 7, 8, 9} and Bakker¹⁰ we know that different priority rules lead to quite different results. The state of the art at this moment does not furnish a complete methodology of selecting the optimal decision rules applicable in real situations. The greater part of research in this field concerns singular products. Maintenance objects usually are assem-

blies; this leads to a network structure of maintenance operations. The scheduling of orders of that type is known as multi-project scheduling, which is in the early stages of development.

The assignment of work at higher levels brings on specialization, which can lead to several process types – continuous, batch or single project – presenting relatively less scheduling problems than the job-shop type^{9,11}.

In general it can be said, that a great store of knowledge on scheduling in production processes is available. This can be applied to maintenance processes because the problems to be solved are identical. Hence, independent development of techniques for application to maintenance is not required.

However, areas exist where the state of the art of scheduling has not yet matured to the desired level. Maintenance processes are on a par with production processes as suitable objects of research into scheduling.

Process planning

This results in the plan of execution, specifying route, operations and material needed. It is based on the design of the product. In maintenance, the same information has to be supplied, but in this case the rather well defined design fails as a basis. Because the technological state of each object differs from one to another, the operations and the material needed show a stochastic behavior. The actual picture for each case can only be determined by individual inspection. This leads to a splitting up of a maintenance job in two major phases, the inspection or diagnostic phase and the execution phase (figure 5).

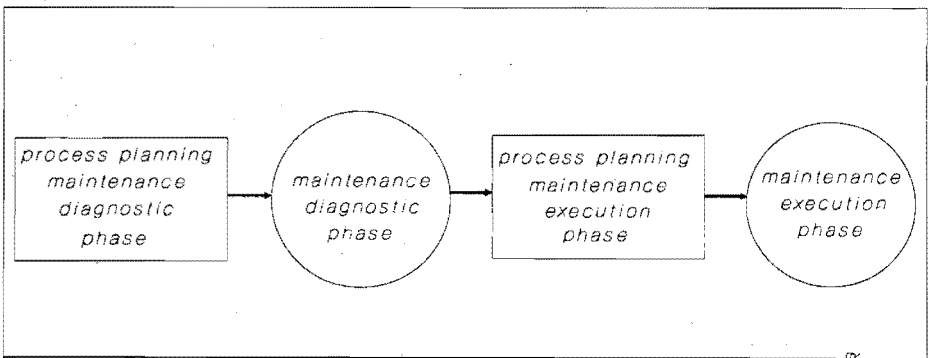


Figure 5. Maintenance job as a two stage process

The inspection or diagnostic phase replaces the design phase of production processes. If projects of a certain identity arrive more frequently, throughput times can be predicted more reliably. If the frequency is very low the reliability of the prediction becomes low, and this is also usual in job shop-production.

Though the final content of process-planning and maintenance is similar, the information needed as a basis comes from noncomparable sources. That means that the information needed will have to be found by studying the behavior of the objects to be maintained. This is a typical maintenance problem for which there is no analogy in production. The provisioning of material will be treated separately.

– *Available versus direct issue*

If clients' orders could be predicted perfectly, waiting for delivery could practically be eliminated. As prediction it is not that accurate, a certain inventory is necessary to serve as a buffer between the fluctuating output of production and the fluctuations of the demand. Direct issue by manufacture on order is possible but it will have to be balanced against the capacity needed for replenishment of the inventory when promising delivery times. It is evident that, if there is no balancing mechanism, the risk of favoring direct issue production at the expense of the replenishing of the stock – with undesired results in the longer term – is very great. In comparing production processes, we find a very direct analogy in the stock of inventory, which serves the same purpose of buffer to disconnect the fluctuations of maintenance output and demand by the client – in this case the production process, or in the military, organization operations. A practical difference of great importance is the fact that the client, possibly wishing direct issue, is the same as the one who will suffer from lack of future availability if insufficient capacity is left for the replenishment of the buffer. This means that, in such a situation, the client must be willing to reduce his initial requirements or, putting it positively, he must tune his operational plans to the maintenance possibilities. Though the analogy of potentially conflicting interests is evident, the problem to be solved is substantially more simple in the maintenance case than in the production case. If the fluctuations between maintenance output and demand for maintenance lead to unacceptable waiting times, a buffer is to be built in between maintenance and consumption.

– *Maintenance planning and production planning*

Longterm planning for the size and kind of facilities and manpower involves the same problems in maintenance as in production. Mid-term planning for maintenance, however, ought to be much more accurate as the future 'clients' will all arrive, and there will be no possibility of refusing them. Though the planning processes are analogous, the mid-term planning in particular requires a relatively high quality.

– *Market*

Market research as a basis for long- and mid-term planning in production supplies the forecast of the demand for a diversity of products within the potential production range. The products considered attractive for the producing organization are selected by policy decision. At the time of realization clients will turn up and the policy decision will prove right if the resulting demand is in balance with the forecast. In maintenance, however, all clients are known. The ‘market’ in this case is the entire collection of facilities and equipment of the organization. The study of the future workload requires study of the behavior of these objects, which is not comparable with the methods used in market research. As the manufacturing processes consuming maintenance constitute the maintenance market, it is possible to represent the maintenance process as a closed loop, as illustrated in figures 1, 2 and 3. It stresses the possibility of direct observation of all clients and of direct control of the use of the production means in order to achieve the tuning in order to achieve the tuning in of maintenance and operations. These possibilities are practically unavailable in production. That means that the constant tuning of maintenance and production is a typical maintenance problem.

– *Conclusions*

In comparing production with maintenance, the following conclusions can be summarized.

- Analogies between production and maintenance exist in terms of scheduling and process planning, long-term and mid-term planning. There is no need for an independent theoretical approach to these aspects in maintenance.
- The behavior of objects to be maintained has no analogy, and requires an independent theoretical approach.
- Relatively more simple than in production is the reconciliation of maintenance required by production and maintenance capability of the organization, as all objects to-be maintained are known beforehand and production and maintenance can be controlled within the same organization. This, however, requires an independent theoretical approach if the control system is to be regarded as closed.

5. Behavior of objects to be maintained

– *Relevant aspects of behavior*

From the production point of view – disregarding optimization constraints – it would be appreciated, if production means would:

- not fail
- if failing, show very few failures

- if failing, show failures that are somehow predictable
- if failing and if repairable, be returnable to the working state within a short time.

Requirements of this nature cannot be met if they are not quantifiable. Scientific development in the last decades has yielded the quantifiable properties that cover the aspects mentioned.

- *Quantifiable relevant behavioral properties*

The requirements mentioned concern three behavioral aspects:

- failure behavior
- maintenance time behavior
- availability behavior.

Failure behavior

A failure is when a system, e.g. a production unit, changes from the state in which it can fulfil its productive function to the state in which it cannot fulfil that function. It does not matter if restoration of the unit to the ready or up state is possible or not. Failure analysis is of importance for the prediction of failure. The probability of failure is quantifiable by measuring the failure intensity. This property, the *failure rate*, is expressed as the ratio of the number of failures and some relevant measure of productive use, measured over a certain period of time. For instance, it could be the number of punctures of a tyre in 10.000 miles, or the number of times a lighter does not work out of a hundred times it is pressed to be lighted. The failure rate as a function of time (or practical equivalents like mileage, flyinghours, number of operations, etc.) shows whether the failure intensity is constant, decreasing or increasing.

An often quoted characteristic, which is sometimes supposed to have general validity, is the so called 'bathtub curve' (figure 6). Research in real situations has shown that the curve is not generally valid. This is of importance because the validity of the models in which the failure rate is used is not independent of the failure rate gradient^{14, 15}.

As the times to failure will show variance, the failure rate as such does not give an answer to the primary question as to whether a mission that requires a certain failure-free operation time can be accomplished. If a number of failures is known and arranged in a histogram (figure 7)¹⁶, it appears that the answer can be given in probability terms.

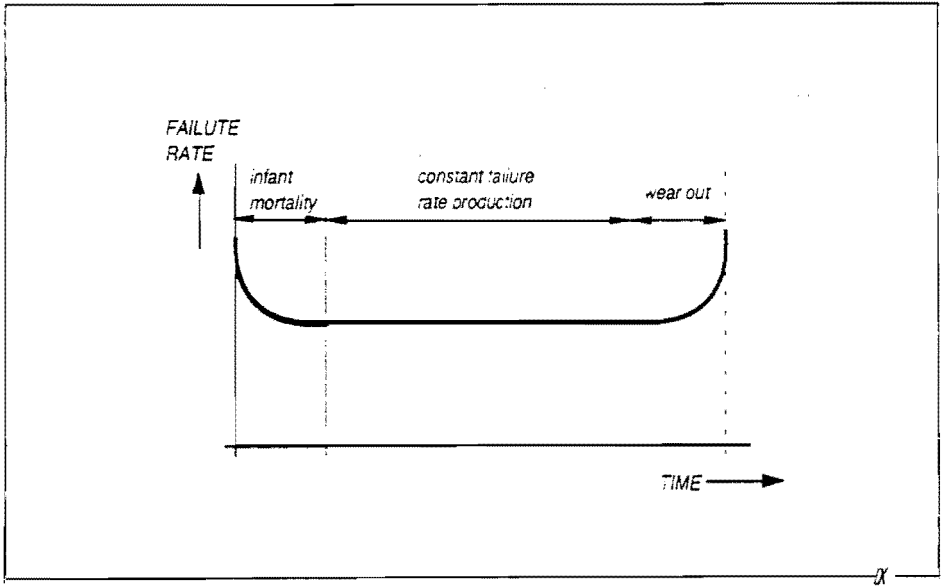


Figure 6. The bath-tub curve

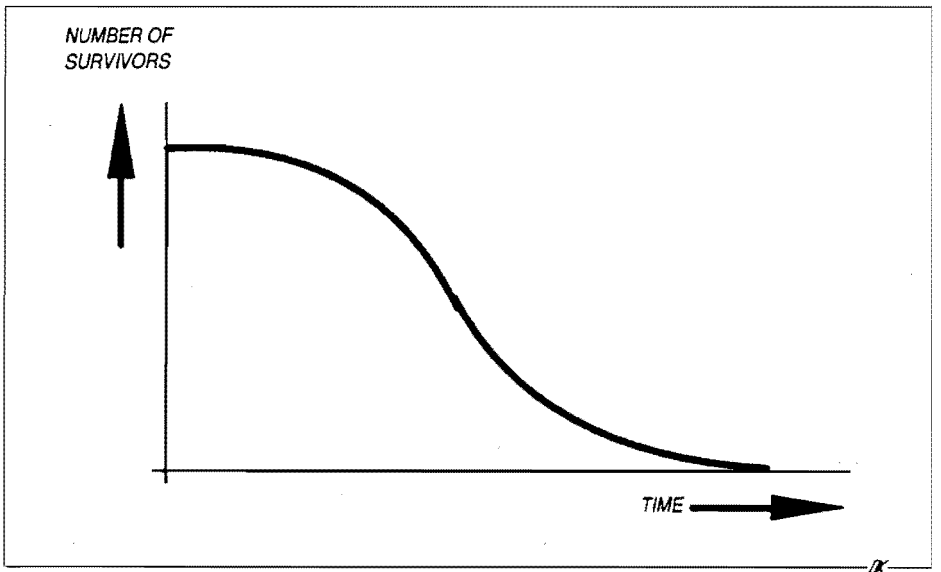


Figure 7. Survival characteristic

There is a diversity of characteristics that can be found, as illustrated by MORSE¹⁶ (figure 8). The property characterized this way is known as *reliability*, defined as the probability that a system will accomplish a mission of given mission time successfully, under stated operational and environmental conditions, and if the system starts the mission new or at the beginning of an up-interval.

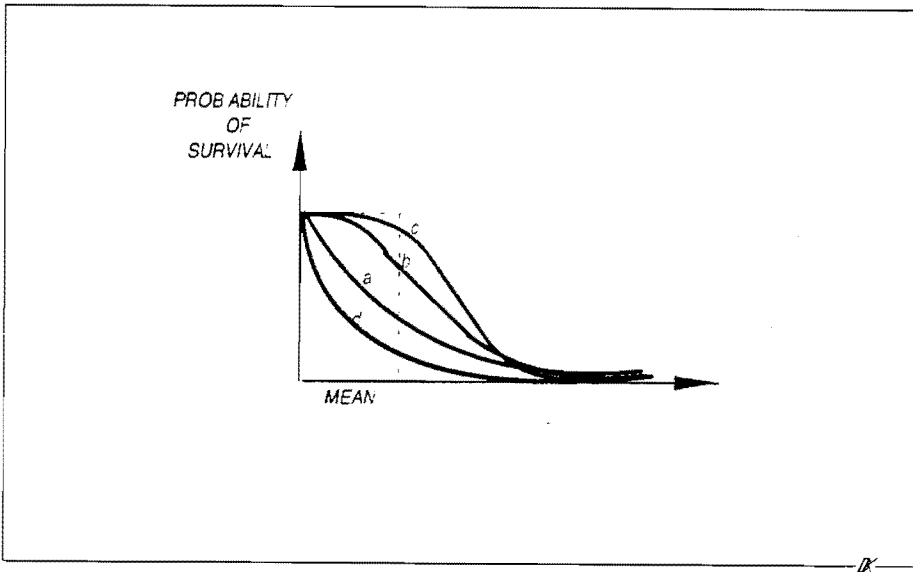


Figure 8. Reliability characteristics

Reliability theory has developed out of the necessity for prediction of system reliability at the time of design, in order to be able if necessary, to increase the inherent system reliability by redesign. There is a vast amount of theory on reliability and a growing number of practical performance requirements for a diversity of components.

The majority of investigations in real situations concerns electronic components. The structure of reliability knowledge is influenced by its use in the process of designing and by the method of measurement of the promised or required reliability.

Maintenance time behavior

If a failed system is repairable and repair is executed, the repair process takes time. The interval of time from the moment that the failure is known until the moment that the system is restored to the ready state, is called time to repair. The property representing the behavior of the time to repair is a probability, known as *maintai-*

nability; this is analogous to the time between failures (figure 8). It is defined as the probability that repair will have been executed successfully within a certain time of the failure becoming known and under stated conditions of the maintenance organization. Figures 7 and 8 represent maintainability by substituting 'maintenance time' for 'time to failure' and 'maintenance' for 'survival'. Studying maintainability leads to splitting up the property into elements, of which preventive maintainability and corrective maintainability are mentioned here. The knowledge of maintainability is far less developed than that of reliability. A rather broad and systematic approach has been made by Goldman and Slattery¹⁷. Practical applications are reflected in particular in Military Standards. As with reliability, the structure of maintainability knowledge is influenced by its use, primarily in the design phase.

Availability behavior

A system can be either of two states, the *up state* and the *down state*. It is in the down state when the system cannot operate because of preventive or corrective maintenance being performed. It is in the up or ready state if it is operating or if it can start operating when called upon.

The property characterising the availability behavior is *availability*, defined as the ratio of the sum of the up times and the sum of the up- plus down times, measured over a period of time. Availability has been known under several names for quite some time, e.g. serviceability and readiness. Studying availability requires the examination of each sub-element. Availability knowledge is less developed than the knowledge of reliability and maintainability. In practical design applications, one can make use of reliability and maintainability models and standards, as these implicitly implement availability to a high degree. This will be shown in the next paragraph.

Relation between reliability, maintainability and availability

If the number of failures over a period of time is known and the mean of the maintenance times in that period is known, the product of these two represents the sum of the down times. The total period of time being known, this means that availability is also known. The expression of availability as a product of number of failures and maintenance time, illustrated in figure 9,¹⁷ shows that a specified availability can be achieved by means of several combinations of reliability and maintenance times.

Actually, the iso-availability curves plotted in the plane are projections of a – hypothetical – availability surface, illustrated in figure 10,¹⁷ in which the availability axis has been added.

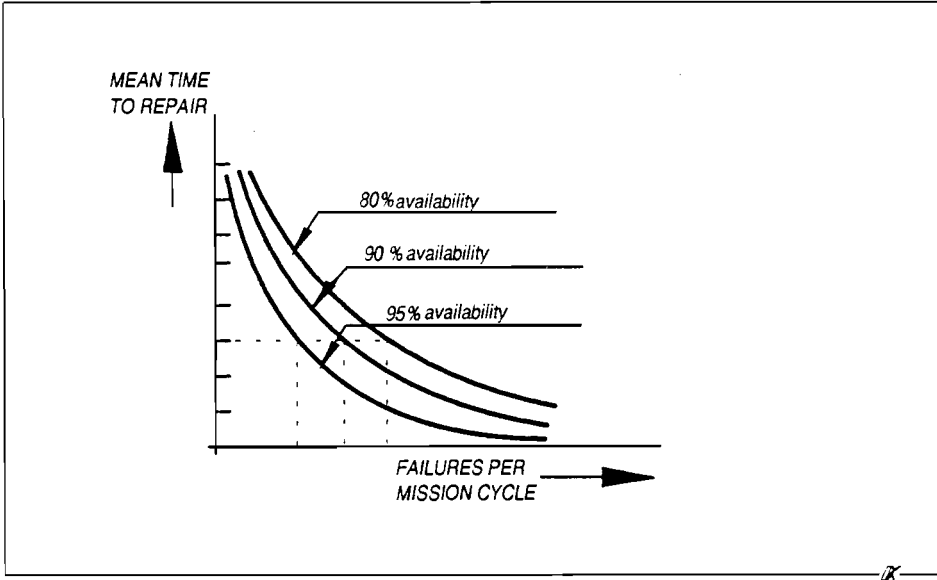


Figure 9. Graphical relation between reliability, maintainability and availability

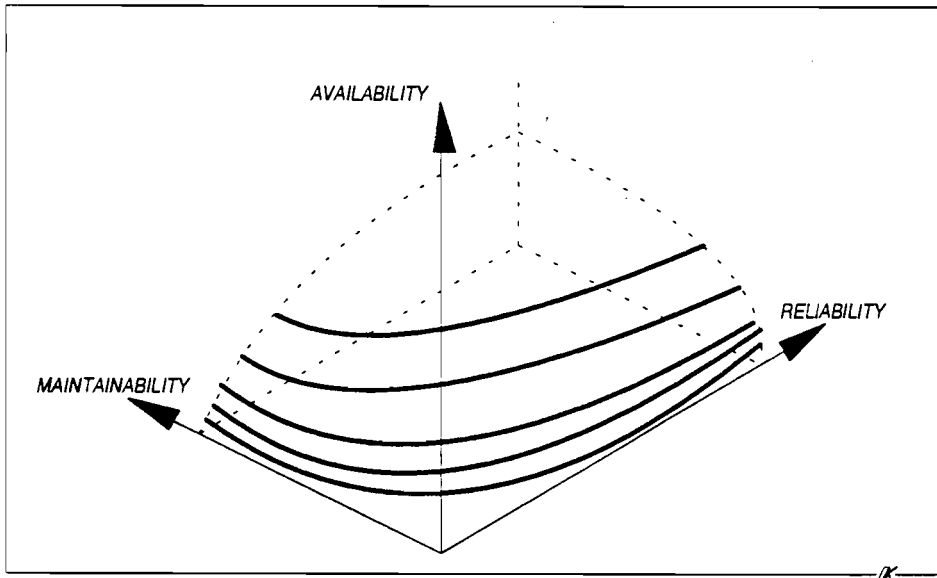


Figure 10. Hypothetical availability surface

It is to be noted that reliability and maintainability in this illustration do not stand for these properties in their strict sense of probabilities but as averages over the same period of time for all three properties. Goldman and Slattery¹⁷ develop this idea further to a direct relation with cost. In the case of design, reliability or maintainability can be changed: in the case of a system in use and with an inherent reliability, availability can be influenced only partially by influencing the length of maintenance times. A combination of reliability and availability turns up if conditional probabilities are considered: for instance, the probability that a system will perform a mission of a given length of time if it is called upon at any random instant of time, or at a random instant within the interval in which the system is in the up state.

Practical use

The practical use of failure rate, reliability, maintainability and availability appears to be great in the process of design of new, complicated and expensive systems. There is not much evidence of application and systematic use in the design of relatively cheaper systems. The majority of experience is related to electronic systems. It is likely that the application in other technological areas and concerning simpler systems will gradually increase, as inductive experience and methods become available from large scale research activities.

6. Maintenance conception

– *Maintenance policies*

When maintenance has to be executed because of failure or because of preventive maintenance being due, a number of activities have to be developed. The structure of these activities for one maintenance level can be represented as shown in figure 11.

This diagram illustrates the need for decision-rules in the mechanism generating preventive maintenance, concerning the actions to be taken when restoring to the up state will not be performed at the same level of maintenance. This of course has to be laid down for each type of object requiring maintenance. The total set of determined directives dealing with the way an object is expected to be maintained in the using organization is called the *maintenance conception*¹⁸.

For the choice of the different primary possibilities roughly the following strategies can be distinguished:

- *'Wait and see'*, which means that no preventive maintenance is performed and that no maintenance will be considered until the event of failure.
- *Opportunistic* policy, which means that maintenance does not start until the

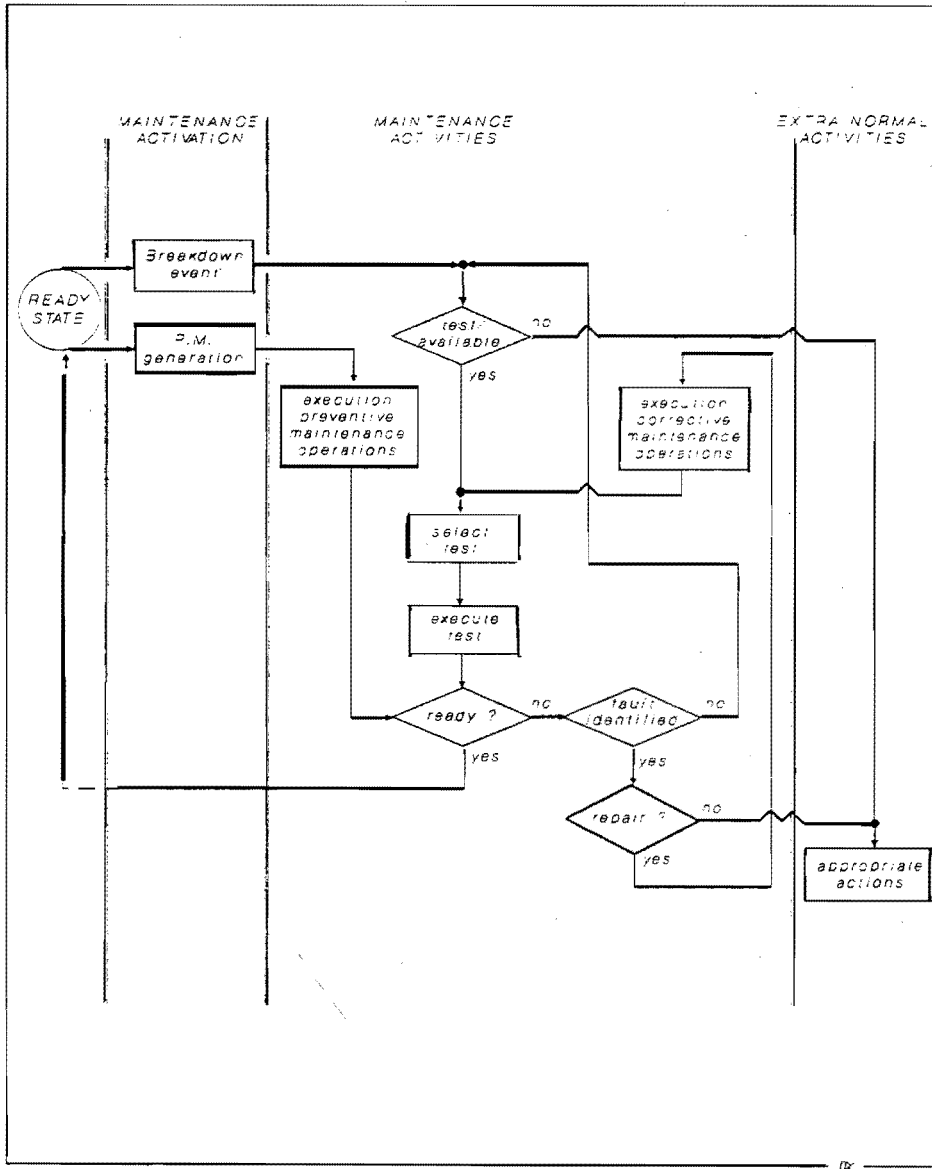


Figure 11. Item oriented maintenance activities structure

event of failure, but at that time preventive maintenance is executed in addition to corrective maintenance.

- *Preventive policy*, which means that part of the maintenance is executed in the non-failed state with the objective of preventing or reducing failures.

To arrive at a maintenance conception, a choice has to be made out of a diversity of alternative possibilities. To have a closer look at these possibilities and their effects, the following three aspects are distinguished:

- the behavior of the object to be maintained
- requirements, wishes and constraints from production
- the echelonized structure.

– *Behavior of objects to be maintained*

Inherent versus organizational properties

From the point of view of production, which maintenance has to serve, failures should be scarce and if failure turns up, restoration to the up state should not take much time. The failure behavior can be measured by the failure rate – for the intensity of the failure events – and reliability – for the probability of undisturbed production. The maintenance time behavior is measurable by means of the maintainability. An object has received a reliability and a maintainability through design and manufacturing independent of the use of the maintaining organization. As such, these are *object-inherent* properties. In real situations these properties will be influenced by the way the objects are used, by their environment and by the maintenance organization. The practical problems encountered, if the inherent properties are to be distinguished quantitatively from the *organizational* properties, cannot be neglected. However, they will not be discussed here. It may suffice to stress the fact that the properties are, to a very large extent, functions of the objects chosen (the inherent value). It is on this basis that a maintenance conception is to be constructed; the importance of implementing requirements that are derived from the maintenance process in the specifications for procurement is, of course beyond doubt.

Policies and assumptions

In general there are two assumptions underlying maintenance policies. The first concerns the assumed relationship between the amount of maintenance and failure behavior; the second concerns the assumed conditions for application of preventive policies. The assumed relationship between the amount of maintenance and failure behavior is usually visualized in graphs of the type of figure 12¹⁹.

In this model, the cost of maintenance curve implies that down time decreases continuously to zero if maintenance costs are raised. This implies that the failure-reducing effects of preventive maintenance are unlimited. Practical experience shows, however, that there is a limit to the down time reduction that can be reached. What happens in reality is shown in figure 13.

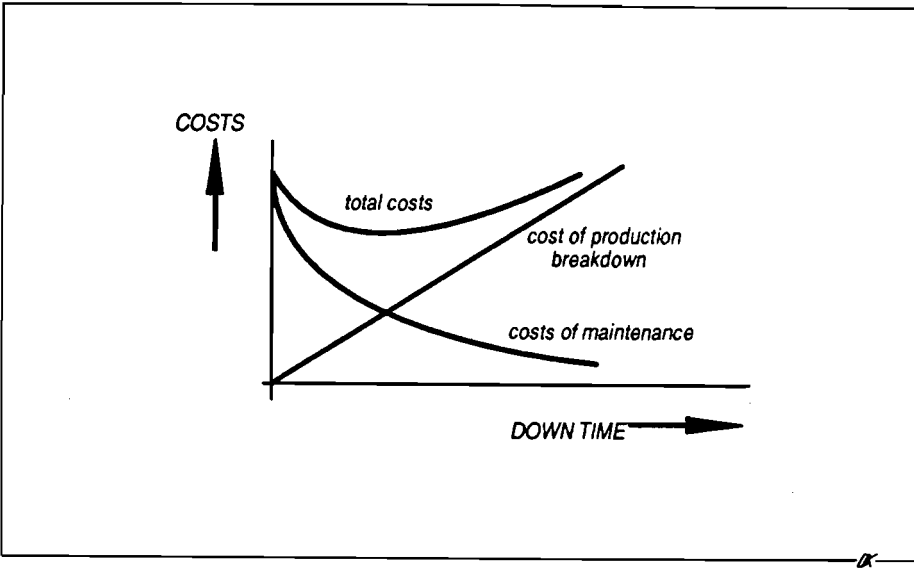


Figure 12. Relation between maintenance and down time costs

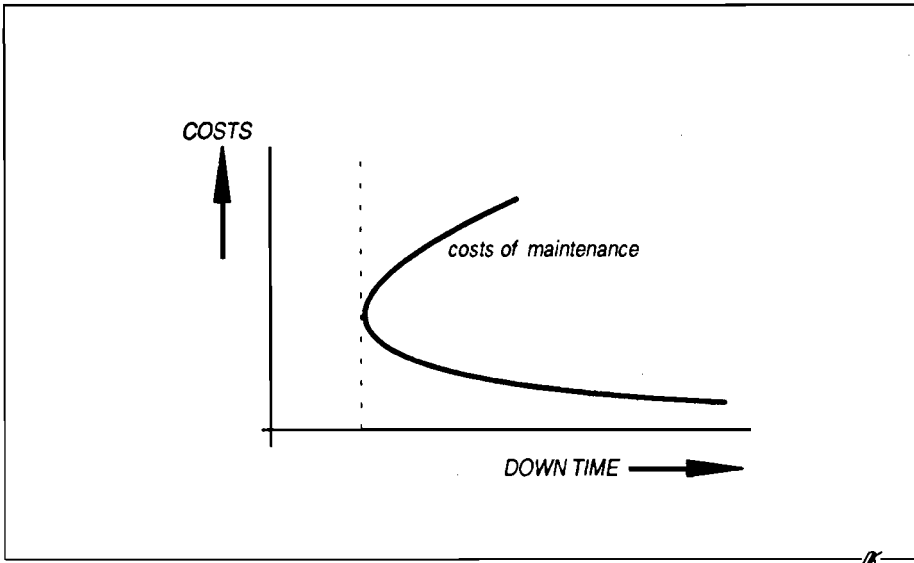


Figure 13. Relation between maintenance and down time costs

If the minimum of the attainable down time is reached, further increase of maintenance will result in an increase of down time. Figure 14 shows the effect of this on the total cost curve. This aspect, which is shown more explicitly in figure 15 demonstrates that increasing preventive maintenance does not necessarily lead to a decrease of down times; an increase of down times may result.

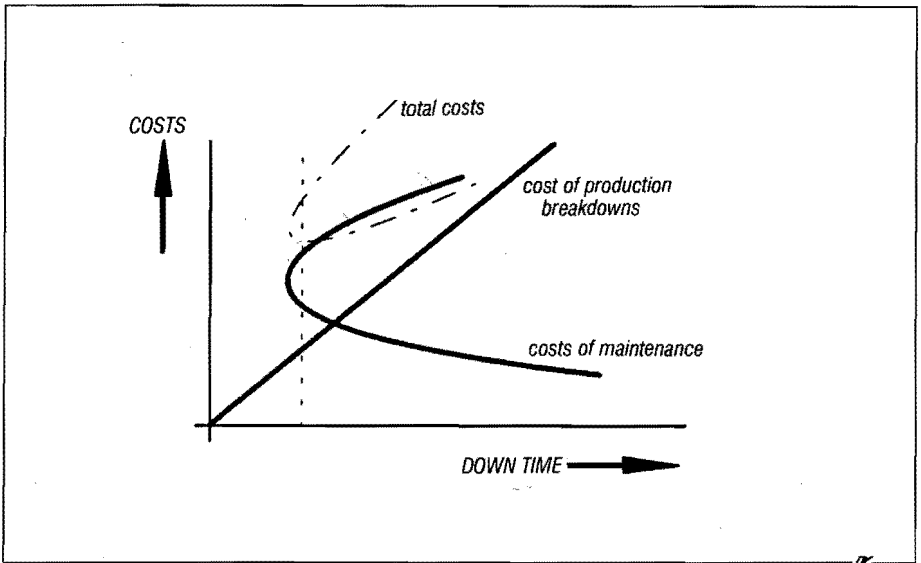


Figure 14. Relation between maintenance and down time costs (corrected)

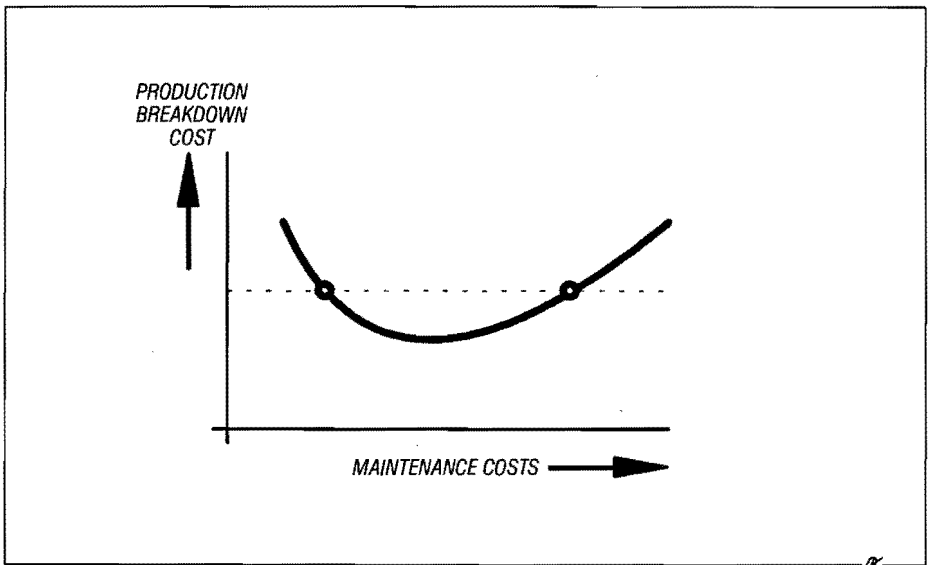


Figure 15. Relation between maintenance and production breakdown costs

The effect, also known as 'overmaintenance', has been investigated rather thoroughly by HUSSEY et al¹⁴ for an air line, in which it was found that the majority of the components investigated were overmaintained.

The second assumption sometimes found in the literature (e.g.¹⁵ page 71), is that the failure rate of the parts subject to preventive maintenance must be strictly increasing. The rationale for this assumption is the consideration that constant failure rate implies that the probability of failure is independent of the time in use; consequently, replacement does not increase the reliability. In figure 8 curve a, representing the negative exponential case having constant failure rate, preventive maintenance yield no benefit. In the hypergeometric case represented by curve d, preventive maintenance would decrease the reliability. The curves b and c and the ideal case represented by the dotted line hold possibilities of increasing the reliability by means of preventive maintenance. As will be shown later, the assumption mentioned can be held only with the addition: 'if the policy depends on information that is limited to the times to failure (or times between failure) only'.

Problems in using behavioral properties

The failure rate, reliability, maintainability and availability have great potential possibilities in arriving at a structural frame for a theory of maintenance because of the combination of quantifiability, predictability per object and relevance for the possible alternative maintenance policies and maintenance conceptions.

According to the present state of the art however, there are several problems hampering application, namely:

- the composite nature of maintenance objects
- the ambiguity of function and failure
- the problem of data collection
- the difficulty of determining optimal preventive maintenance policies.

The *composite nature* of maintenance objects leads to a collection of failure rates and reliabilities, because the objects consist of various parts. The failure rate of an object is therefore the result of the superposition of the individual failure rates of all parts. Reliability characteristics are not related to one technological type of failure any more. It is likely that, in the end, failure behavior of a system is always random. That makes analytical determination of a preventive policy for a composite piece of equipment much more difficult than the elementary approach suggested.

The *assumed relationship* between *function* and *failure* suggested that there is an unambiguous connection between the two. In studying the function of a system

we usually find that the function consists of a number of capabilities. Some of these are not always needed, some are of more importance than others. Function appears to have a composite structure, consisting of a number of subfunctions, which do not all have the same importance and which sometimes can be combined in a different way, corresponding to different operational modes. This leads to rather severe complications when trying to analyze the behavior of objects and the results of the maintenance performed on them.

The problem of *data collection* is or will partly be solved by means of modern automatic data processing and data transmission equipment. This does not solve the problem of how to collect the relevant data at the place of origin. The careful registration of the state at the time of installment, state at the time of failure, failure type, corrective action, etc. requires an expensive amount of work, while the accuracy of the collected information is limited by human constraints^{20,21}. An investigation by the Royal Netherlands Air Force of a sampling system to determine reliability, maintainability, availability and failure rate for aircraft showed that the variance of the deviation from the completely registered figures was far too large to be usable. The majority of data available today concerns electronic components. For a wide application of quantitative methods, more figures will have to be gathered originating from tests and real situations, eventually leading to figures that are generally valid for defined conditions and material. Then statistical sampling and testing methods will undoubtedly enable reduction of the workload of registration.

The difficulty of *determining optimal preventive maintenance policies* was mentioned before. If failure times analysis were the only basis for preventive maintenance, the number of possibilities would in all probability be limited. If failure behavior is stochastic, optimal policies can be determined for several situations. Jorgenson et al¹⁵ present the analytical theory for this case. In the usual analytical approach, the time to failure is the only information to start from. As this period is regarded as a black box, only the statistical probability of failure can be determined. This does not, however, enable prediction of difference in failure behavior from one individual failure to the other. In many a case there is still a possibility that this can be opened up by looking into the black box period, if individual indications can be found that failure is to be expected. This is illustrated in figure 16. It is based on the assumption that an object subject to failure shows properties that change gradually from an initial value to a fatal limit, being the value of the property at which the object will enter the failed state. If such a property exists, which is manifest if found, the quantitative drift can show different behavior, characterized by the curves A, B and C in figure 16.

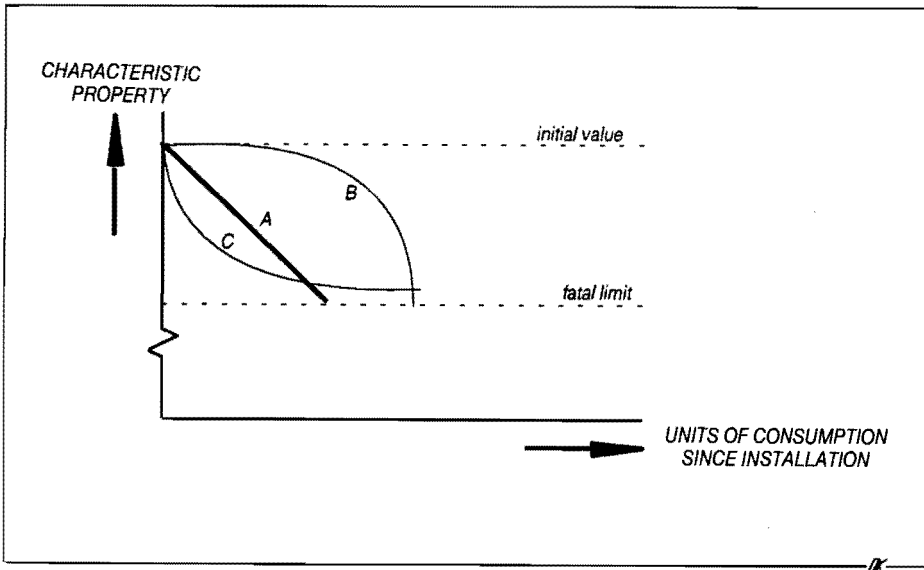


Figure 16. Endurance curves

Curves A and B will be treated separately. Curve C is clearly rather insensitive, as the point at which the fatal limit will be crossed varies much on the horizontal axis, if the value of the characteristics property measured varies a little. This means that it is incorrect to use this type of property characteristic. It could be something like measuring the quality of the paint of a car in order to quantify the operational time left before overhaul of the vehicle will become necessary. Other properties, showing the behavior of the curves A and B will have to be found in such a case. If we look at the distribution of the times to failure, figure 17 illustrates that this concerns the values on the horizontal axis only.

The same goes for the curves of the B-type. In the case of the A-type curve, the drift of the characteristic property is a linear function of time (or some other time-related unit of consumption).

As figure 18 illustrates, periodic sampling of the value of the characteristic property enables one to decide at what time preventive maintenance will have to be accomplished in order to prevent failure. The sampling constitutes *preventive inspection*, meaning a check of some property after which taking or not taking corrective action is the result of the comparison of the value found and the appropriate control value. In this way it is possible to select individual objects out of a population, in which the distribution of the times to failure may be of any of the possible types. The control limit is termed the *absolute control limit* because the value measured in the sample is compared with a control limit that is directly deri-

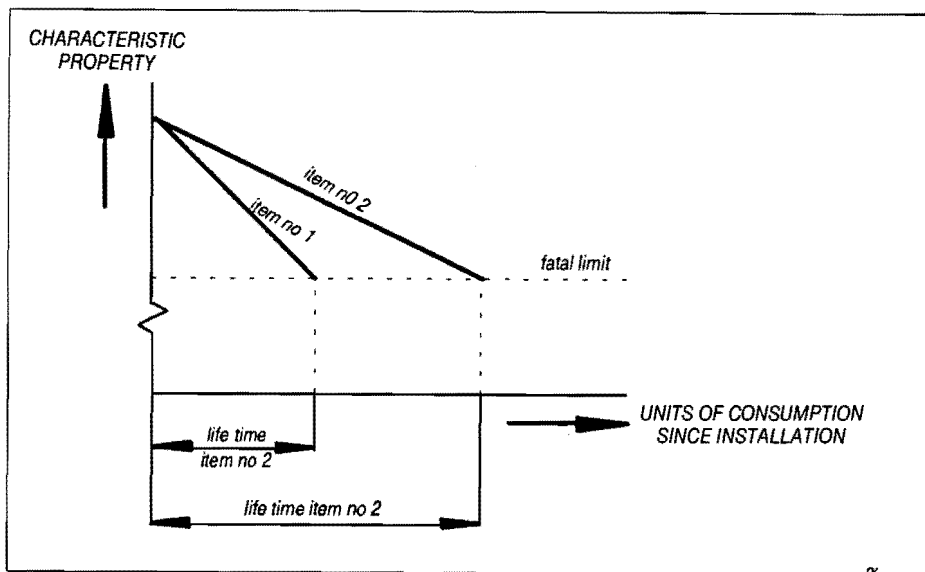


Figure 17. Endurance variation

ved from the value which is fatal. The determination of the length of the periodic inspection interval and of the value of the control limit resembles the inventory control problem of determining the order cycle interval for a system with a possibility of ordering at fixed intervals only and the determination of the reorder control limit. Expected delivery time in that case is analogous to the time estimated to be necessary to plan and execute the appropriate maintenance in order to bring the characteristic property back to its initial level (figure 16). In the case of curve B the same method, using an absolute control limit, is possible. The model of this curve, however, opens up another possibility that reduces the risk of being too late if the curve has a steep descent in the last phase. In this case (figure 19), the value of the interval difference could be measured and compared with a control limit – *the relative control limit*.

The theoretical aspects underlying preventive inspection have not received much attention, though it is not entirely absent from the literature²². The systematic research into the possibilities of the application of preventive inspections and how to assemble them into periodic packages in a maintenance conception, seems of primary value for the development of maintenance. The new ideas about designing out maintenance, which lead to more systematic application of modular structures, will undoubtedly offer more profitable opportunities for this method. The measurement of the depth of profile of tyres is a rather well known example of preventive inspection by absolute control limits. A much more sophisticated application, indicating the new possibilities of preventive inspections, is worth

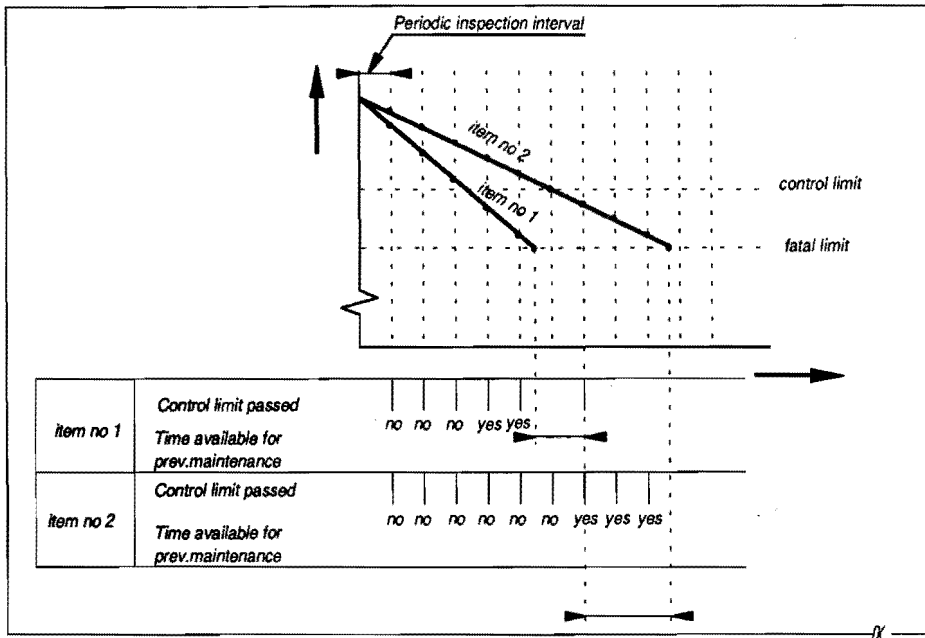


Figure 18. Preventive inspection by absolute control limit

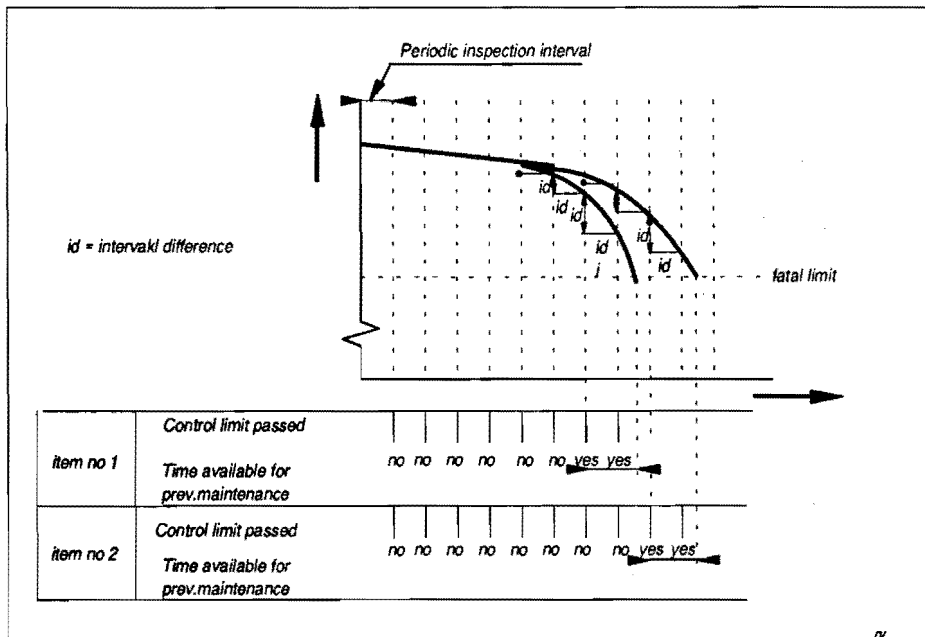


Figure 19. Preventive inspection by relative control limit

mentioning. It is a method to predict imminent failure of aero engines by periodic analysis of aero engines by periodic analysis of engine oil samples, the so called SOAP – Spectrometric Oil Analysis Program²³. By spectrometric analysis of the oil sample, the concentration of a number of metals – considered characteristic – are measured. By logging these values of an engine and by studying their development abnormal increases are detected. Analysis of the underlying technological behavior of the values, individually and in combination, shows what components in the engine assembly are expected to fail. A new development in data collection is AIDS – Aircraft Integrated Data System – opening up the possibility of continuous valve registration during operation²⁴.

It is evident that the application of the preventive inspection method does not depend on a theoretical approach to the maintenance aspects only. Also the systematic search for characteristic properties of the technological processes deserves special attention. A working group of the Netherlands Society for Efficient Maintenance is studying practical aspects of the preventive inspection method and is expected to report on their findings early next year.

– *Requirements, wishes and constraints from production*

Primary aspects

The primary wish of production is continuity of the production process. In some cases production will be uninterrupted. This is to be regarded as a special case of the production pattern. Usually, the production pattern consists of a series of productive and non-productive intervals. The maintenance conception has to take into account the opportunities for maintenance in the non-productive intervals in the production pattern, as well the reliability and availability requirements in the productive intervals. The alternative policies are determined by the object to be maintained.

This leads to distinguish between the following types of objects:

- large, *singular* systems (such as the energy supply system in a factory, a radar installation, a paper manufacturing machine, etc.)
- *groups* of identical rather *simple* and cheap objects (such as lamps)
- *groups* of identical rather *complex* and expensive objects (such as motor vehicles, aeroplanes, lathes, etc.).

Large, singular systems

The most important property of large, singular object is the fact that an important operation cannot be fulfilled if the system fails, because there is no alternative capability available. That means that reliability and availability should have high values. The reliability is given, being an inherent, design property; it can be high by virtue of the use of components with high reliability and also by using redundancy. The availability may be influenced by the using organization by minimi-

zing maintenance times and by searching for preventive inspection possibilities, thus increasing the organizational reliability. The maintenance times may be reduced by having components available for replacement, so as to eliminate the maintenance time of the component itself from the critical path. For the lower levels of maintenance, the schedule will make maximum use of the non-operational period in the production pattern if it is progressively structure. This *progressive maintenance* policy is a preventive policy in which the collection of preventive maintenance activities that have to be performed periodically has been split up into packages of activities that require the same length of maintenance time. In this way the periodic maintenance can be dispersed over the whole period, so that execution can be fitted into the non-operational periods in the production pattern or can be combined with non-operational periods because of corrective maintenance (opportunistic policy).

For higher levels of maintenance requiring a relatively long period of down time, the appropriate method to minimize down time is process-planning and control by means of networkplanning techniques. The availability results are limited by the inherent availability built into the design, which in some cases can be relatively low. The maintenance policies to be considered for systems of this type need fundamental study to determine the maintenance conception and the achievable availability to be accepted as a constraint of the existing design.

Groups of identical, simple objects

If groups of identical, simple, and hence usually cheap, objects are in use, renewal instead of repair is more economic in many cases. If the effort to renew the units hardly depends on the number to be renewed and if the renewal effort is not to be neglected compared with the price of the item, it can be more efficient to renew the whole group at a time, when one or more have failed or when a characteristic measurable property has reached a certain value. In the case of lamps, this could be the renewal of a group based upon a certain number failed or after the decrease of the light intensity below a certain level. This is a preventive inspection method in cases where the failure rate increases with age. It is known as 'group replacement' or 'block replacement' and has been studied analytically, giving models for practical application²⁶.

Groups of identical, complex objects

If an object is used in quantity (e.g. aircraft, vehicles, lathes, etc.), the availability manifests itself to production as the number of units in the ready state. One can influence this quantity by having an additional number that are allowed to be inoperative for maintenance. Optimization then concerns the investment in this additional number and the cost of achieving a certain maintenance throughput time. Equipment of this type usually requires several levels of maintenance. If the number available with the user varies too much, this may require a more systema-

tic preventive structure of the maintenance conception. It is then possible to determine the average number that will be in the maintenance part of the loop (figures 2 and 3). This average has to be increased by an additional amount because of fluctuations in the arrival pattern for maintenance and in the maintenance throughput times.

The final decision on the number of items that will be used as buffer, called *turnaround*, should be based primarily on the mission effect²⁷ of the object and on the investment in procuring additional unit over and above the number needed for direct use. This decision implicitly includes the determination of average throughput times for preventive maintenance and the quantified non-availability to be accepted at the user's level.

In controlling this number, the so called '*staggerline*' (figure 20 and 21) enables anticipation of the arrivals for maintenance. The staggerline is a graphic representation of the behavior of the property characteristic between two preventive maintenance treatments, e.g. hours operated or mileage in an overhaul policy. Figure 20 shows a case where the arrivals in the near future will most probably be about the average.

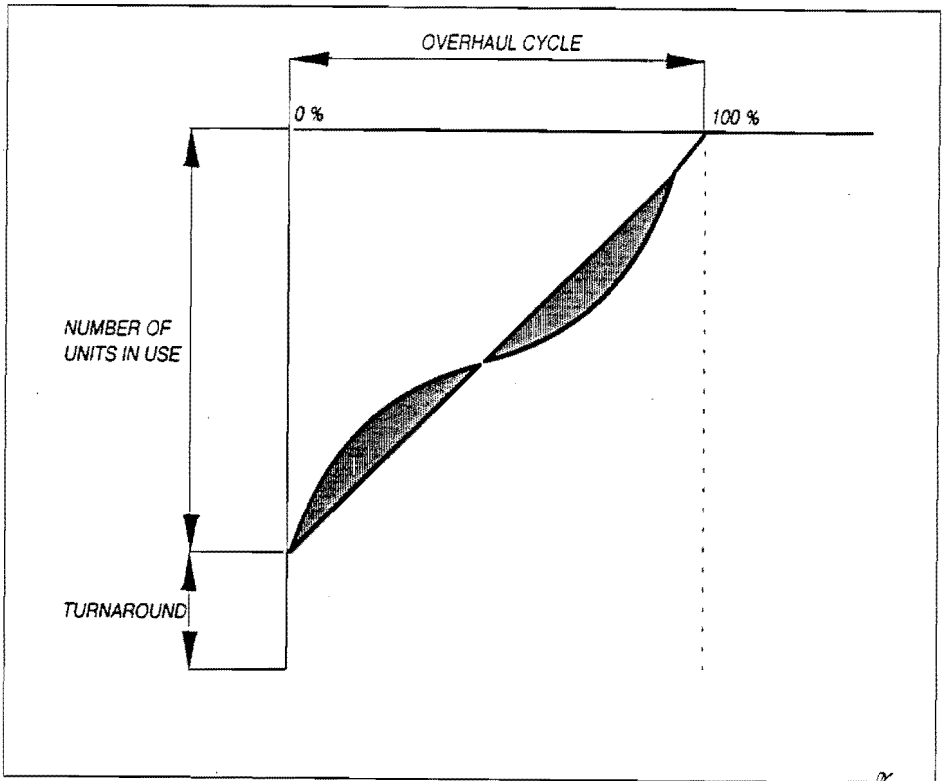


Figure 20. Example of HSO status

Figure 21 shows a case where arrivals in the near future will, in all probability, be lower than normal, but will be followed by a period in which a larger number than normal will become due for maintenance. This may be prevented by taking into units at an earlier moment than the nominal end of the cycle or by influencing the use of the units in use by indicating which units have to be used more or less intensely.

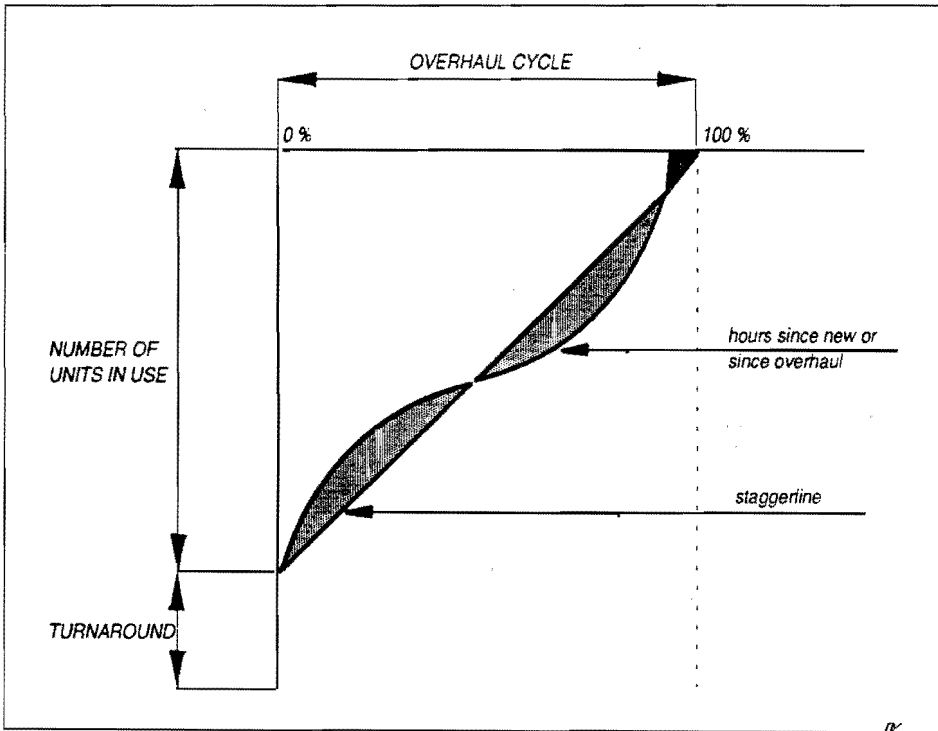


Figure 21. Example of HSO status

In the case where a group of identical units is introduced at the same time, serious danger exists that the arrival pattern will show a high peak, causing the number of units not available for production to become greater than the number calculated as turnaround. This effect is illustrated in figure 22.

To prevent this peak, it is necessary to start the maintenance earlier in the first period for a number of the units. The effect of this is shown in figure 23.

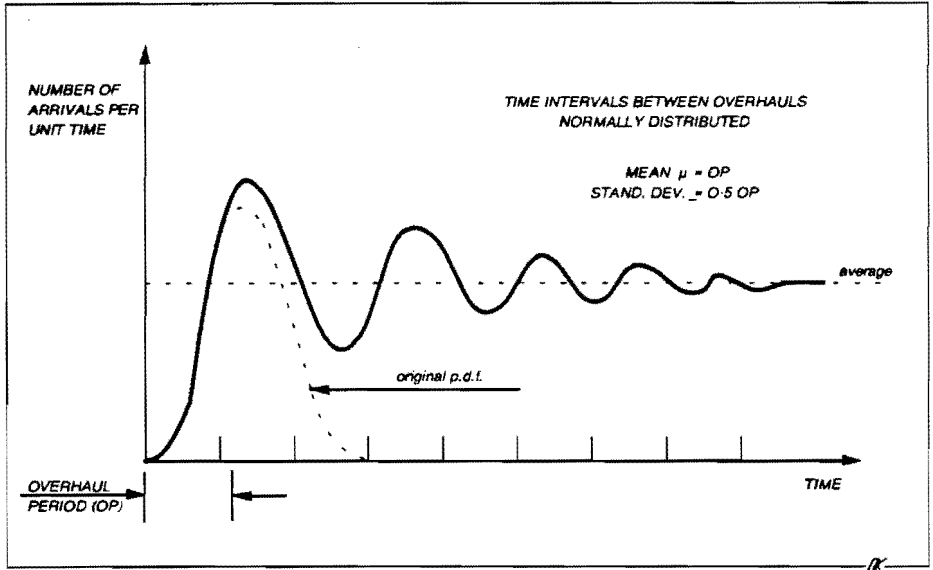


Figure 22. Arrival pattern for overhaul

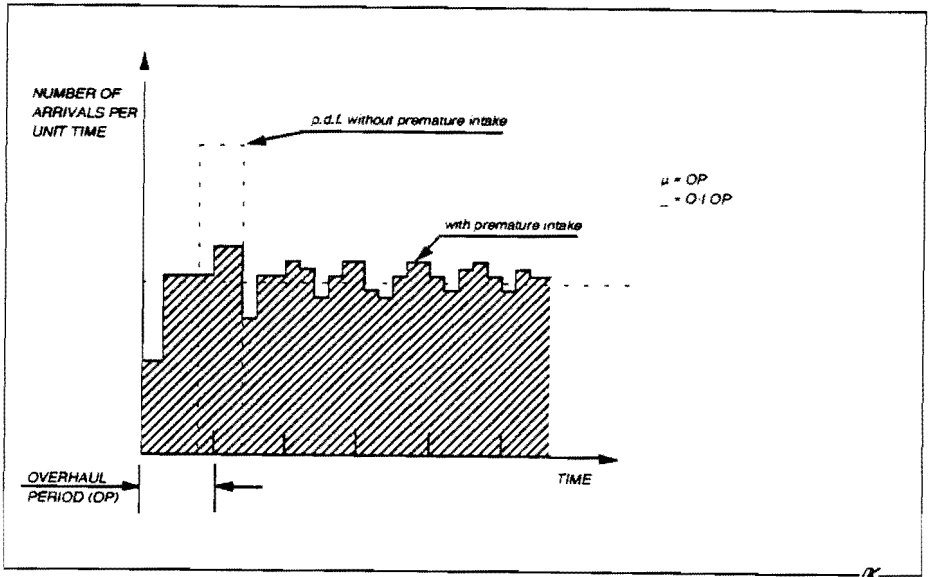


Figure 23. Numerical simulation of the arrivals for overhaul with premature intake

Figure 24 shows (for a real case²⁷) how the decision to start premature maintenance can be made and followed up by means of the periodical sampling of the status. This approach has been investigated and tried out by the Royal Netherland Air Force for a practical application²⁷.

The maintenance of groups of identical, rather complex, units can be controlled in this way, including anticipating measures for their use in production and for their arrival in the maintenance process.

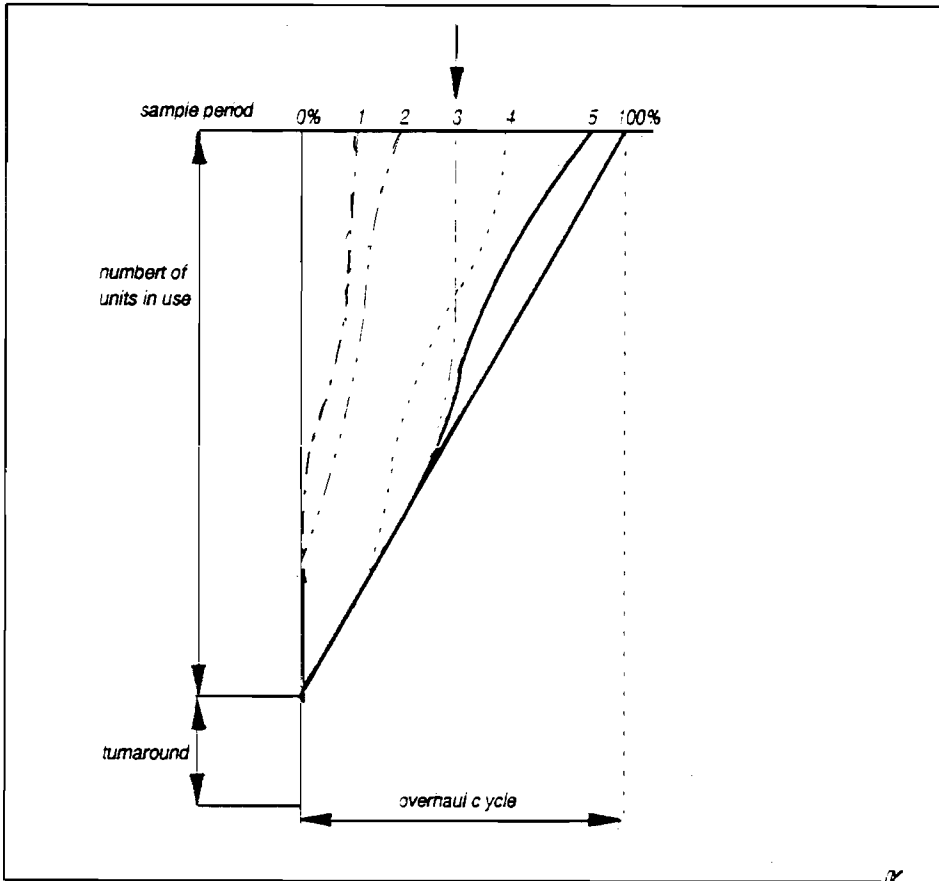


Figure 24. Five successive HSO status samples with premature overhaul start after sample at end of periode 3

– Conclusions

The failure rate, reliability and availability are of vital importance to maintenance because their required value can be derived from production and because mainte-

nance results can be measured by means of these properties. The properties in real situations are different from the inherent values because of organizational influences. Within a limit to the achievable results, the maintenance conception and the control mechanisms for maintenance execution determine the actual results.

To arrive at a maintenance conception, the alternative maintenance policies have to be known to enable the selection of the optimal policy. This requires study of the production pattern.

In many cases the desire to apply preventive policies will require a study of the characteristic properties that can serve as control values.

Singular objects, groups of simple objects and groups of complex objects require different approaches.

As yet, there is no theoretically developed methodology for the process of constructing the maintenance conception for objects.

7. Inventory control

Quite some effort has been devoted to the study of inventory control problems, in particular through the impact of operations research. The underlying philosophy is the recognition that having stocks involves costs of stockholding, and that having too small or too large stocks in the end leads to higher costs than choosing the right amount. The models concentrate on finding minimum stock levels for a set minimum service rate. The service rate represents quantitatively the acceptability of having to wait.

Typical problems to be solved are: forecasting demand, determining the moment at which to order and the amount to be ordered¹² in echelonized inventories, developing distribution decision rules of a more complex nature because of interdependencies¹³. There is a vast amount of literature on inventory control that reflects the state of the art.

– Typical aspects of inventory of spares

Multiple demand

The most striking aspect in comparing the inventory problems in a maintenance system with those in a production system is that the 'raw material' available at the beginning of a production process is practically non-existent. The material needed is to a great extent of specific identity and is needed in some diversity at

different points of time in the maintenance process. There is some resemblance with the production assembly processes. The delay penalty in case of stockout and the diversity of material that can cause it require a rather sophisticated inventory control system in order to prevent serious decrease of availability or high investment in stocks.

Diversity of frequency of demand

A second aspect that differs from the production process is the fact that the items to be carried are determined to a considerable degree by the mere fact of possessing a piece of equipment and having to maintain it. It is not possible to exclude an item from the inventory because it is unattractive from a point of view of inventory control itself. The same goes for the possibility of simplifying inventory control by increasing market share and hence demand. This rather rigidly defined assortment is more meaningful if the frequency of transactions is taken into account. Figure 25 illustrates the diversity of an inventory running into over 200.000 different items and covering very low as well as very high frequencies of transaction. The most notable fact, typical for maintenance stocks, is the large portion of items in the low frequency range (figure 26).

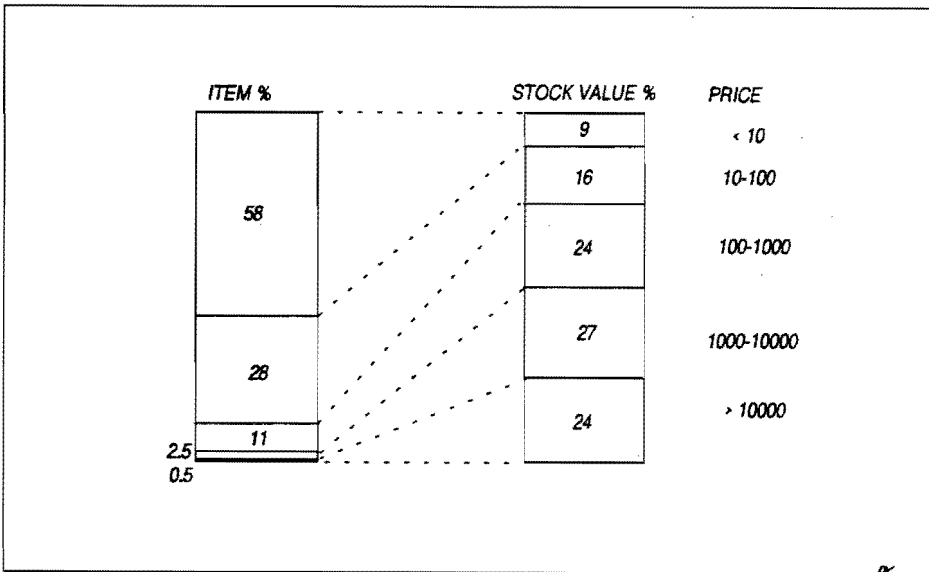


Figure 25. Value distribution of stocks

Because a large number of these items are complicated, involving long and unreliable procurement times and high prices, they account for the greater part of the investment in stocks for maintenance. Owing to this diversity of the behavior of maintenance stocks, a few simple decision rules for the control of the inventories are not sufficient. The rules applied will have to cover the full range. The pro-

blem of finding workable decision rules is made worse by the limited effectiveness of statistical methods applied to small populations.

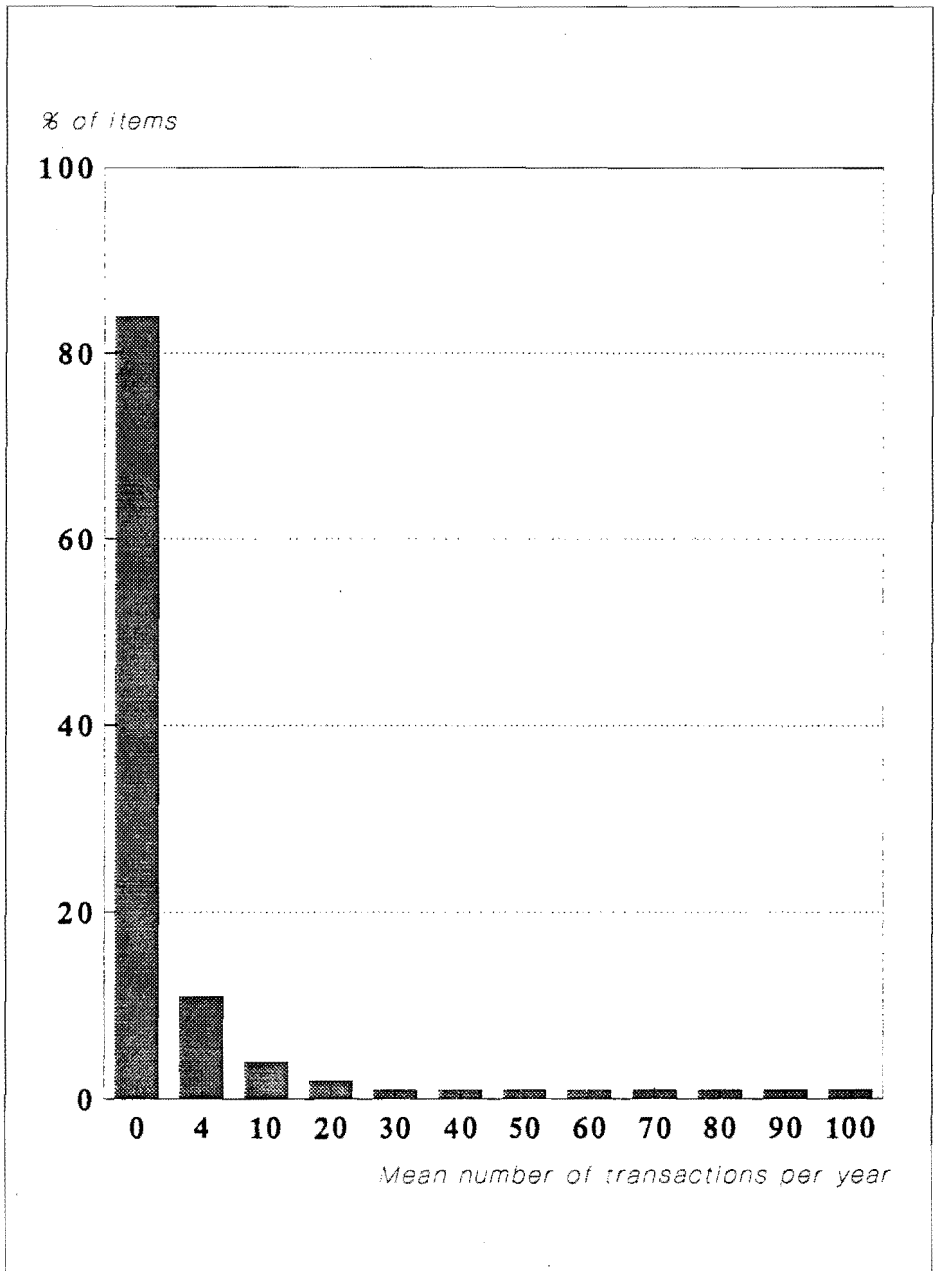


Figure 26. Item transaction frequency

Forecasting

A third problem is the limitation in the possibility of determining forecasting of demand. Research into the correlation between consumption and intensity of operations by the Department of Industrial Engineering of the Technological University of Eindhoven²⁸ confirmed the findings of similar research that application of this method – insofar as it is applicable at all – yields minor improvement as compared with statistical forecasting^{29, 30}. However, the items investigated were in the range of over 20 transactions per year. Forecasting demand by a casual model for slow moving items will undoubtedly require rather complicated decision models with many variables. If the frequency of demand is high and if the demand is stable or has a reasonably wellknown trend, several forecasting techniques can be applied.

One may be able to forecast via causality in those cases where the demand is mainly determined by maintenance activities of a repetitive nature. Shortterm and midterm demand can then be predicted by using a bill of material, in which the number of items needed per maintenance job is not rigid as in production but is foreseen with a probability of expected demand.

Service rate

A variable of vital importance in inventory control theory is the service rate, usually defined as the fraction of all requisitions that could be honored by direct issue, measured over a representative period. This control variable is too simple to serve in inventory control for maintenance processes. As a maintenance job usually requires more than one item, the waiting times for material are of the touring car type. More relevant than the service rate per individual item is the probability that an item will cause a delay in a maintenance job. It is to be noticed that ordering and receiving material, together with the maintenance operations, are activities in a network structure. This means that material delivery delay will cause maintenance delay only when this activity is on the critical path. One step further would be to anticipate the actual demand and add to a requisition the latest time of arrival. The time element in material suggests that service rate should be viewed as a more complicated aspect than the usually mentioned ratio (fig. 27 and 28)³¹.

What one would like to know in the end is the quantitative effect on availability of different inventory decision rules. Trials in that direction have hardly been made, undoubtedly because of the complexity of the underlying models. Karr described an approach in which the spare-part essentially is qualified and serves as one of the decision parameters³².

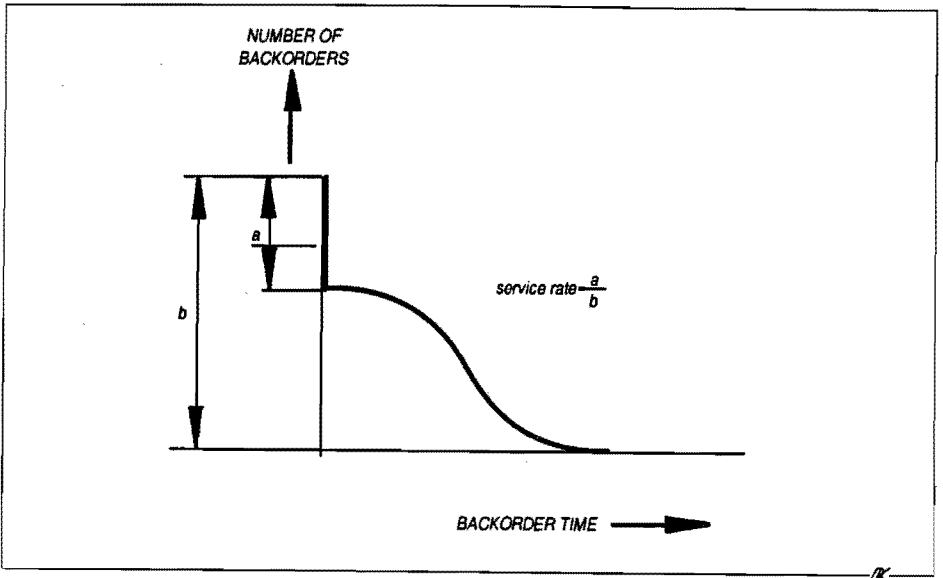


Figure 27. Backorder time characteristic

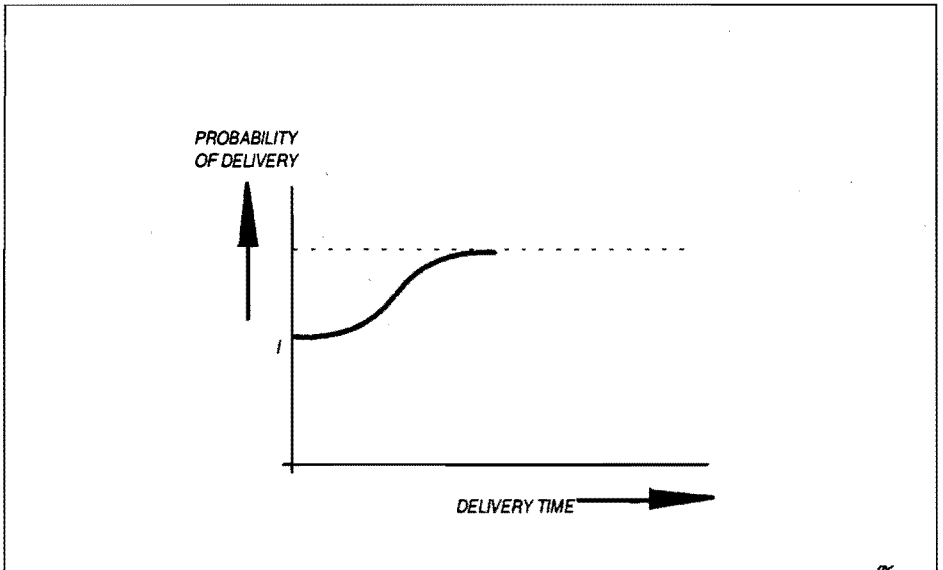


Figure 28. Delivery time probability characteristic

Turnaround

In this paper turnaround is defined as the number of units of an item (identity) held in addition to the number continually authorized for operational use, in order to be able to execute maintenance while affecting the number continually in use as little as possible. The decision to use a turnaround results from the maintenance conception chosen for the item concerned. If it concerns components, the maintenance of the component corresponds with delivery time as far as its behavior in the inventory is concerned; but as it is a closed loop system, the delivery time can be influenced by means of priority rules in the maintenance process. This puts more emphasis on the maintenance planning and control side than on the inventory control side. Behavioral aspects of systems of this type require fundamental research.

Echelonized structure

Organizations having a maintenance task of some size usually show echelons in maintenance as well as in the inventories. Not much research has been done on the effects of interrelations between the different levels. The study of Forrester¹³ has shown the dangers of multistage systems in which decision rules are developed independently for each stage. In the Royal Netherlands Air Force the introduction of third generation automatic dataprocessing equipment enabled us to cope with this danger by – apart from other reasons – centralizing the information of all echelons, instead of the usual hierarchical structure visualized in figure 29.

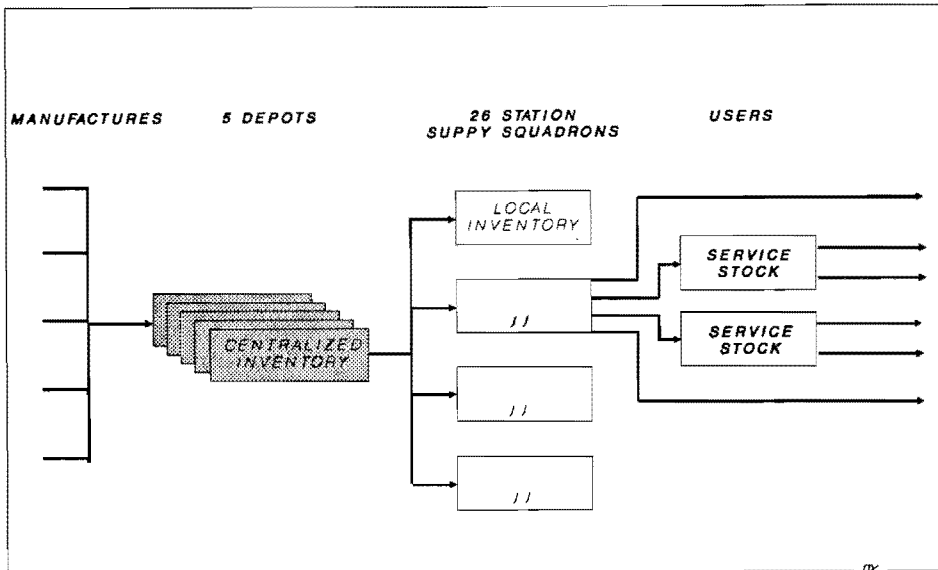


Figure 29. Two stage inventory chain

A new problem, originating from this decision, is the manner in which the redistribution, vertical as well as lateral, should be controlled. Study of this problem by an analytical approach was started recently by the Technological University of Eindhoven.

Initial demand and insurance type items

There are two cases in which the forecast of demand cannot be based on historical figures. The first case is the forecast of initial demand at the time of introduction of a new piece of equipment. The second case is the forecasting of insurance type items. These are items that, for practical and economical reasons, can only be procured as long as the production line concerned is working. Though experience elsewhere and manufacturer's advice are helpful, the final decisions lie with the user. In these situations the only source available is the experience and know-how of personnel in the user's organization, assisted by historical data of equipment supposed to be similar. It is doubtful if analytical research into the behavior of technological systems will lead to the replacement of man by quantitative models for this type of forecasting. More reliable advice by the manufacturer can be expected as a byproduct of the growing attention that is being paid to reliability and maintainability aspects in the design stage. Karr³² mentions results of research into the reliability of estimation methods by mechanics that deserve more attention for standardized application.

Conclusions

The following conclusions can be summarized. Reviewing existing scientific knowledge in the area of inventory control, we find a vast amount of a more or less fragmentary nature. The many problems which strike one when reviewing inventory control of spares for maintenance seem to justify an independent theoretical approach fitting in fragments already developed.

To achieve that result it is necessary to find the underlying structure that enables the selection of policies and methods to be used in actual situations. This will lead to a better indication of the areas to be researched by analytical approach, by simulation and by empirical research in actual situations.

Research of this kind is being done by the Royal Netherlands Air Force in cooperation with the Department of Industrial Engineering of the Technological University of Eindhoven. At this stage the emphasis lies with analytical model-building and the use of real figures for testing, leaving out the maintenance aspect for the time being.

8. Additional aspects

– *Economics*

The analysis of process behavior and the design of systems and decision rules to control them requires the selection from alternatives. It is evident that, in many cases, direct comparison is impossible and that measurement of the alternatives needs a common denominator. If possible, the most complete study is the cost-effectiveness approach, which includes the time span from design to the ultimate disposal. Studies of this kind have emphasized the importance of estimating the costs over the operational period at the time of design and procurement²⁵. This aspect will have to be used whenever practical as a matter of course in the building of the quantitative models. As knowledge of the economics of the effectiveness of non-productive organizations is growing³³, its contribution can be expected to grow substantially.

– *Multidisciplinary approach*

It is generally accepted that the classical dogma derived from a monodisciplinary organization theory cannot hold out against critical scientific research and re-evaluation. Though these research activities are still going on and have not yet resulted in a new generally accepted theory, it is taken as evident that real situations in an organization have to be met with a multi-disciplinary systems approach. The developments in this area of knowledge will undoubtedly lead to important contributions to the analysis and application of maintenance conceptions and of maintenance control systems.

– *Maintenance and design*

Because maintenance as such is concerned with objects that enter the maintenance process as they have been procured, all inherent properties having relevance to maintenance are more or less fixed from the moment of arrival. Though design cannot be regarded as maintenance, the rapidly growing knowledge of the way in which to make allowance for maintenance aspects in the process of designing should be mentioned. Symptoms of it are modular constructions, accessibility, redundancy, built in test equipment and such like. Maintenance will not only benefit from this development, but will also have to supply empirical statistical information in order to indicate what aspects require special attention in new designs. The Netherlands' Society for Efficient Maintenance installed a working-group recently with the task of developing directives, designed for practical use, to be used in the formulation of requirements derived from maintenance, and to be incorporated in the procurement specification.

9. Towards a theory of maintenance

– *Conclusion*

According to the point of view developed in the foregoing paragraphs, maintenance is to be regarded as a controlled process of activities. The need for better control of maintenance is evident. To arrive at a better control, there is a need for a theoretical comprehensive structure that is unavailable today. Fragmentary knowledge in some areas appears to be applied scarcely, in spite of the depth covered scientifically. This indicates that further research concerning these areas should be directed not vertically but laterally, according to the systems view, and that capability of practical application should be a vital consideration. Knowledge in analogous areas requires little or no modification for application. On the other hand, other areas appear to have been investigated insufficiently and consequently require fundamental research.

Scientific fields that appear to have been, or are being, researched sufficiently in the present state of development of a maintenance theory are:

- production control theory
- OR-theory in particular concerning failure rate behaviour, reliability and availability
- inventory theory as far as fundamental aspects are concerned
- modern organization theory
- economics.

Problem areas requiring fundamental research aimed at the maintenance process appear to be:

- maintenance policies including object behavior
- design of maintenance conceptions
- cybernetic mechanisms concerning the balance of the maintenance and production process
- inventory control of spare parts.

– *Recommendation*

The development of general theories is one of the tasks of the universities, in particular in the departments of industrial engineering. There is a need for more attention to the maintenance than in the past.

The systematic analysis of and approach to maintenance in real cases will primarily be a task of the using organizations. As the maintenance task is relatively small compared with other functions in an organization, activities of reasonable sizes in this field can be expected only from large organizations and from the mili-

tary organizations in particular. In the first place they have to test the results of general models in real situations so as to correct the general models. In the second place, they have to report on the findings of their research in real situations so as to supply the experimental knowledge needed for inductive development of general models.

The first step to be taken now is the organization of more appropriate ways of exchanging information than are available now.

In more general terms, it could be stated that maintenance development requires that maintaining today's situation be prevented.

Literature

1. Turban, E., *The Pulse Beat of Maintenance Today*, Factory, 124 (1955), nr. 6, pp. 98110.
2. Rawson, K.J., *The Navy's need voor reliability*. Paper 1, 1968 – Conference on 'the Reliability of Service Equipment', London 1969. The Institution of Mechanical Engineers, pp. 1-9.
3. Wharton, T., *The need for Reliability in the Royal Air Force*. 1968 – Conference on 'the Reliability of Service Equipment' London 1969. The Institution of Mechanical Engineers, pp. 10-15.
4. Geraerds, W.M.J. and Le Poole, L.H., *Nomenclatuur 2. Onderhoud* (1967), nr. 4, pp. 74-75.
5. Buffa, E.S., *Modern production Management*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
6. Conway, R.W. and Maxwell, W.L., *Network dispatching by the shortest operation discipline*. Oper. Research 10 (1962), nr. 1, pp. 51-73.
7. Conway, R.W., *Priority dispatching and work-in-process inventory in a job-shop*. Journal of Industrial Engineering 16 (1965), nr. 2, pp. 123-130.
8. Conway, R.W., *Priority dispatching and job lateness in a job-shop*. Journal of Industrial Engineering, 16 (1965), nr. 4, pp. 228-237.
9. Conway, R.W., Maxwell, W.L. and Miller, L.W., *Theory of Scheduling*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1967.
10. Bakker, W., *De levertijd in machinefabrieken*. Doct. thesis, Waltman, Delft, 1965.
11. O'Brien, J.J., *Scheduling Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1969.
12. Van Hees, R.N. and Monhemius, W., *Productiebesturing en voorraadbeheer. Algemene beginselen*. Centrex, Eindhoven, 1964.
13. Forrester, J.W., *Industrial Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964.
14. Hussey, P.A. and Thomas, S.G., *Are scheduled component overhauls necessary?* SAE – National Aeronautic and Space Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, Oct. 5-9, 1964, 8 pp.
15. Jorgenson, D.W., McCall, J.J. and Radner, R., *Optimal Replacement Policy*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967.
16. Morse, P.M. *Queues, inventories and maintenance*. Wiley, New York, 1958, 202 pp.
17. Goldmann, A.S. and Slattery, T.B., *Maintainability: a major element of system effectiveness*. John Wiley & Sons, New York, 1964. 282 p.
18. Geraerds, W.M.J. and Le Poole, L.H., *Nomenclatuur 4. Onderhoud 2* (1967), nr. 10, pp. 216-218.
19. Newbrough, E.T., *Effective Maintenance Management*. McGrawHill, New York, 1967, p. 61.
20. Harris, D.H., *The nature of industrial inspection*. Human Factors, 11 (1969) nr. 2, pp. 139-148.
21. Carroll, J.M., *Estimating errors in the inspection of complex products*. AIIE Transactions, 1 (1969), nr. 3, pp. 29335.
22. Barlow, R.E. and Proschan, F., *Mathematical theory of reliability*. Wiley, New York, 1965.

23. Thacker, R., Soap, *Flight Comment*, May-June 1967, pp. 2-6.
24. Scott, G., *Aides Memoires*. *Flight International*, 1968, 4 July, p. 17.
25. McFarland, J.W., *Integrated logistic managment*. *The Journal of the Armed Forces Management Association*, Vol. 2, 1967, nr. 7, pp. 79-87.
26. R.L.Ackoff and Sasieni, M.W., *Fundamentals of operations research*. Wiley, New York, 1968, pp. 211-214.
27. Geraerds, W.M.J., *LTP-beheersingssysteem voor motorisch aangedreven gronduitrusting bij de Koninklijke Luchtmacht*. Literatuuroverzicht TDCK, 11, 1967, nr. OR 97, pp. 175-196 en 11, 1967, nr. OR 99, pp. 247-270.
28. Van 't Hullenaar, F.J.W.H. and Van Winkel, E.G.F. *Forecasting spare parts demand for aircraft of the Royal Netherlands Air Force*. Staff Section Management, R Neth AF, The Hague, Jan. 1970. Paper to be published.
29. Haber, S.E., *A comparison of usage data among types of aircraft*. *Naval Res. Logistics Quarterly*, 14 (1967), nr.3, pp. 399-410.
30. Brown, B., *Micro simulation in logistic research. A comparative study of prediction techniques*. Rand report nr. P-1980.
31. Van 't Hullenaar, F.J.W.H., *Problematiek rondom servicegraad*. Staff Section Management R Neth AF, 17 nov 1969. Unpublished paper.
32. Karr, H.W., *A method of estimating spare part essentiality*, Rand paper P-1064. 17 April 1957.
33. Bogaert, K.A.M. and Kuypers, S.W.M., *Kosten en effectiviteit*. Universitaire Pers. Rotterdam, 1969.

Onderhoud in vogelvlucht

Prof.ir. W.M.J. Geraerds

2

(Integrale weergave van het gedeelte over onderhoud van de afscheidsrede aan de Technische Universiteit Eindhoven op 13 september 1991)

Ofschoon onderhoud ook met de industriële revolutie van betekenis werd is vooral na de tweede wereldoorlog meer en meer aandacht besteed aan het onderhoud als functie.

Onafhankelijk van elkaar ontstonden benaderingen met het oogmerk de doelmatigheid van het onderhoud te verbeteren.

1. De werktuigkundige benadering

Tot, en ook gedurende, de tweede wereldoorlog werd het gedrag van machines en installaties vooral bepaald door werktuigkundige processen. Elektrische componenten waren tamelijk eenvoudig en de intrede van elektronica, complexe en geïntegreerde besturingssystemen, miniaturisatie en geïntegreerde circuits zouden eerst later volgen.

De twee dominerende vormen van storing waren breuk of slijtage. Breuk was het gevolg van onvoldoende sterkte en werd daarom niet zozeer als een onderhoudsaangelegenheid gezien alswel als een ontwerpaangelegenheid. Door verbetering van het ontwerp (beter materiaal, grotere dimensies, e.d.) was storing, en daarmee onderhoud te voorkomen. Die benadering werd bekend onder de slogan 'Design out maintenance'.

Slijtage was een zeer veel optredend verschijnsel doordat veel metalen delen die ten opzichte van elkaar bewogen aan zeer wisselende belastingen werden onderworpen, met grote versnellingen en vertragingen. Onder die omstandigheden zijn ideale smeringscondities niet mogelijk, waardoor metalliek contact en daarmee slijtage optreedt. Overvloedig smeren was de aanbeveling, waarbij de vrees dat de smeerkosten hoog zouden uitvallen werd getemperd met de slogan 'Oil is cheaper than steel'. Slijtage ontwikkelt zich over een bepaalde tijd voordat er

sprake is van storing. Om die te voorkomen werd gepropageerd de betrokken delen voordat storing optrad te vervangen of te reconditioneren. Daarmee deed de benadering 'preventief onderhoud' zijn intrede, in het Amerikaans nog steeds – en vrij ongelukkig – aangeduid als 'scheduled maintenance'.

Preventief onderhoud was aldus onderhoud waarbij de technische toestand van een technisch systeem werd veranderd volgens voorgeschreven werkinstructies, na vaste intervallen in de levensduur van een systeem, ongeacht de technische toestand waarin het systeem verkeerde. Vanwege de vaste intervallen wordt ook de term 'periodiek onderhoud' gebezigd.

Ofschoon deze benadering nog steeds algemeen geldig geacht voorkomt heeft onderzoek aangetoond dat alleen onder zeer bepaalde voorwaarden deze vorm van onderhoud effectief is.

2. Operations Research

Operations research ontstond tijdens de tweede wereldoorlog doordat, in het bijzonder bij de Engelse strijdkrachten, werd gezocht naar oplossingen voor vraagstukken, waarop de gebruikelijke expert, deskundig binnen het betrokken probleemgebied, geen antwoord had. Nieuw in de aanpak was het invoeren van de hulp van een aantal wetenschappers uit verschillende disciplines die gewend waren problemen fundamenteel aan te pakken. Hun aanpak kenmerkte zich door het richten van het onderzoek op de analyse van het proces dat bepalend was voor het bereiken van het gewenste doel. Om de processen voor elkaar begrijpelijk en eenduidig te beschrijven werd de wiskunde het gebezigde gereedschap, met het belangrijke voordeel dat alternatieven theoretisch konden worden onderzocht. Na de tweede wereldoorlog werden de inmiddels, ook in de Verenigde Staten, opgerichte OR-groepen opgeheven, en daarmee de multidisciplinaire groep die zich richtte op opgetreden vraagstukken in 'operations'. Mathematici zetten het werk voort.

Operations research richtte zich nu, zij het veelal beter te benoemen als mathematische research, ook op problemen in bedrijven. Daarbij kregen functies als productiebeheersing en voorraadbeheersing aandacht en evenzo het onderhoud. Dit betrof in het bijzonder het onderzoek naar het statistisch gedrag van storingen om te bepalen welk onderhoud in relatie tot een storing is gewenst. Het werd aangeduid met 'maintenance strategy', 'maintenance policy' en ook wel met het Germanisme 'onderhoudspolitiek'.

Een belangrijke bijdrage van de operations research aan het onderhoud is de introductie van het waarschijnlijkheidsbegrip, daarmee de mogelijkheid tot kansrekening openend, bij de analyse van het storingsgedrag. Met die introductie werd een aantal meetbare grootheden ingevoerd, zoals betrouwbaarheid, en daaraan

verbonden de storingskansdichtheid en gereedheid. Van belang daarbij was dat deze grootheden ten aanzien van hun betekenis in het onderhoud zeer wel herkenbaar zijn in het onderhoudsmanagement.

Door de preoccupatie met het vinden van zogenoemde 'optimale' oplossingen werd al snel een model uit de voorraadbeheersing zonder meer overgeplaat naar het onderhoud. Het model, wel bekend als het rubber stempel van de operations research, verstrekt de optimale waarde, dat wil zeggen: het minimum van inspanning plus resultaat, bijvoorbeeld de optimale bestelhoeveelheid door het afwegen van kosten van een bestelling tegen de kosten van het in voorraad houden.

Toegepast op het onderhoud wordt het model gepresenteerd om het optimale aandeel preventief onderhoud te bepalen door afweging van de preventieve onderhoudsinspanning tegen de reductie in correctief onderhoud of tegen de hogere gereedheid. Het is echter niet mogelijk te voldoen aan de voorwaarde om dit rekenmodel toe te passen, te weten: het bepalen van de mathematische uitdrukking waarmee de betrokken curven worden beschreven. Zelfs wanneer dit mogelijk zou zijn en de optimale, gewenste, waarde zou worden gevonden is het volstrekt onduidelijk wat men anders zou moeten doen bijvoorbeeld bij een afwijking van 5 %. Het enige dat het model wil illustreren is dat men 'niet teveel' en 'niet te weinig' preventief onderhoud moet uitvoeren, en daarmee komt men operationeel niet verder, hetgeen het model suggereert.

Een tweede, eveneens nog regelmatig gecopieerd in publicaties verschijnende figuur, is de zogenoemde 'badkuipcurve'. Hierbij wordt verondersteld dat, nagenoeg, ieder technisch systeem gedurende zijn levensduur een beginperiode vertoont met een dalende storingsgraad, gevolgd door een ruime periode met een constante storingsgraad en afgesloten met een periode met een stijgende storingsgraad.

Ook hier geldt dat het model niet meer dan schetsmatig een gedachte weergeeft, maar niet als rekenmodel toepasbaar is, of kan worden, ontwikkeld. Reeds geruime tijd geleden uitgevoerd onderzoek wijst bovendien erop dat het veronderstelde gedrag zich zelden of niet voordoet. Wellicht wordt gevoelsmatig de organisatorische inspanning bij invoering, na invoering en bij afvoer van een technisch systeem verward met zijn storingsgraad.

De analyse van het gedrag van technische systemen in de operations research is in het bijzonder gebaseerd op de grootte van de storingsvrije perioden. Daardoor is nauwelijks of geen aandacht besteed aan de technische, fysische analyse van de processen volgens welke storingen ontstaan¹.

Daardoor is eerst recent aandacht besteed aan die mogelijkheid die in het kader van het bij de Faculteit Technische Bedrijfskunde TUE uitgevoerde onderzoek werd aangeduid met 'toestandsafhankelijk onderhoud'^{2, 3}.

De bijdrage van de operations research ligt in het bijzonder in de introductie van waarschijnlijkheid in de storingsanalyse en van het begrip betrouwbaarheid.

3. De Amerikaanse benadering

Na de tweede wereldoorlog bleken de logistieke kosten van het gebruik van wapensystemen met hun toenemende complexiteit zo hoog te worden dat het in het budget gebruikelijk resterende aandeel voor de aanschaf van nieuwe wapensystemen in de knel kwam. Dit leidde tot het inzicht dat bij de keuze van een nieuw wapensysteem, type en aantal, niet alleen de aanschaffingsprijs, maar ook de erop volgende gebruikskosten in beschouwing moesten worden genomen. Die benadering is bekend onder de benaming: 'Life Cycle Costing' (LCC).

Bij de toepassing van LCC worden bij het keuzeproces alle onderscheiden mogelijkheden geëvalueerd met betrekking tot de kosten over het traject van aanschaffing tot en met afvoer. LCC wordt in het bijzonder toegepast in het militair-industriële complex. In de industrie kreeg het weinig aandacht. De benadering is ontwikkeld tot een praktisch toe te passen methode, waarin voor iedere stap gedetailleerd is beschreven hoe de kostenberekening moet plaatsvinden. Zij is beschreven in diverse publicaties van onder andere Blanchard⁴.

In verband met een bepaalde onzekerheid over de prestaties, zoals de betrouwbaarheid van nieuwe systemen, worden door het Amerikaanse Ministerie van Defensie garanties te dien aanzien geëist, gepaard gaande met demonstratie ervan bij aflevering.

4. De Britse benadering, Terotechnologie

In 1968 werd door het toenmalige Ministerie van Technologie een werkgroep ingesteld met het doel het ministerie te adviseren over de maatregelen die moesten worden genomen om het onderhoud in Engeland te verbeteren. In 1970 verscheen hun rapport met een reeks van aanbevelingen. Om aandacht te trekken werd in plaats van onderhoud de term 'terotechnologie' gebezigd. Na uitvoerige discussie werd terotechnologie gedefinieerd als:

Een combinatie van management, financiële, technische en andere technieken, toegepast op de fysieke hulpmiddelen in het streven naar economische levensduurkosten.

Daaraan werd toegevoegd:

De uitoefening heeft betrekking op de specificatie en het ontwerpen voor de betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid van fabrieken, machines, uitrusting,

gebouwen en constructies, alsmede op hun installatie, inbedrijfname, onderhoud, modificatie en vervanging, en met terugkoppeling van informatie over ontwerp, prestaties en kosten.

De definitie van terotechnologie geeft wel aan wat men beoogt te bereiken, maar niet wat de daadwerkelijk toe te passen technieken en methoden zijn. De reikwijdte van terotechnologie is bovendien enorm groot⁵; ze omvat niet alleen onderhoud, maar ook ontwerp, en investerings- en vervangingsbeslissingen.

Het National Terotechnology Centre wist aanvankelijk veel aandacht te vestigen op het belang van terotechnologie. Het ontbrak echter aan programma's en kennis, benodigd om de toepassing van terotechnologie duidelijk te maken. Een cursus aan de Universiteit van Manchester trok enige jaren enige aandacht, hoofdzakelijk van deelnemers uit ontwikkelingslanden. Met de verhoging van de inschrijvingskosten voor buitenlandse studenten verdween hun interesse en kwam de cursus ten einde.

Terotechnologie heeft aldus gefungeerd als een aandachtstrekker in het bijzonder ook voor de samenhang tussen onderhoud en ontwerp. Het had echter geen vervolg.

5. De Japanse benadering TPM

Tot 1950 domineerde, evenals vrijwel overal, 'breakdown maintenance', dat wil zeggen: dat onderhoud eerst werd uitgevoerd nadat een storing was opgetreden. In 1950 werd een begin gemaakt met de invoering van preventief onderhoud ontleend aan de Verenigde Staten.

Preventive Maintenance, PM, was daar identiek met wat men nog steeds noemt 'scheduled maintenance'. Dat houdt in dat men na een bepaalde vaste periode van gebruik of tijd een onderhoudsbeurt uitvoert, ongeacht de technische toestand van het technisch systeem. Verondersteld werd dat daardoor de storingen werden verminderd, en daarmee de onderhoudskosten; en dat de gereedheid er door toenam, en daarmee de prestatie.

Nadat de tekortkomingen van die vorm van preventief onderhoud naar voren kwamen werd een bredere aanpak nagestreefd, die in 1960 onder de benaming 'Productive Maintenance' in 1970 zich nog verder uitbreidde onder de thans gangbare benaming 'Total Productive Maintenance'. De aandacht voor onderhoud werd door de jaren heen gestimuleerd door de Japanese Management Association (JMA), daarna door het daartoe opgerichte Japan Institute for Plant Maintenance (JIPM) en thans door het Japanese Institute of Plant Engineers (JIPE). Door de jaren heen was Seiichi Nakajima de drijvende kracht.

TPM wordt gedefinieerd door de beschrijving van zijn 5 doeleinden:

- maximalisering van de effectiviteit van de bedrijfsuitrusting
- ontwikkeling van een systeem van ‘productive maintenance’ voor de gehele levensduur van de bedrijfsmiddelen
- betrekken van alle bedrijfsafdelingen die te maken hebben met de planning, het ontwerp, het gebruik of het onderhoud bij de invoering van Total Productive Maintenance
- actief betrekken van alle bedrijfsmedewerkers van de topleiding tot de werknemers op de werkvloer
- stimuleren van Total Productive Maintenance door motivatiemanagement, en wel door middel van autonome kleine groepen.

In de ontwikkeling van TPM is duidelijk te herkennen dat men zich grondig, en bij voortduring, heeft georiënteerd op wat elders gebeurde, waarbij men de goede elementen selecteerde en opnam in TPM.

Zo was het benadrukken van de levensduur kenmerkend in de Amerikaanse LCC benadering en in het Britse terotechnologisch model. In dit laatste krijgt tevens het ontwerp bijzondere nadruk. Verbetering van een technisch systeem in TPM wordt ook als onderhoud gezien (ook al is modificatie feitelijk geen onderhoud, maar ontwerp). In Japan wordt modificatie zelfs aangeduid met ‘correctief onderhoud’.

Het meest typerende in de Japanse aanpak is de enorme toewijding die wordt verkregen van alle medewerkers, zoals dat al eerder was gebleken bij de kwaliteitsbeheersing en in de productiebeheersing. De mogelijkheden tot verbetering in de bedrijfsvoering, niet alleen in het onderhoud, vormen onderwerp van bespreking in de ‘circles’, die daartoe regelmatig vergaderen. Aanbevelingen gaan niet in de ideeënbus, maar worden doorgeleid naar de manager, eventueel directie, die beslist.

Opvallend in de Japanse aanpak is de niet aflatende aandacht voor verbeteringen (‘kaizen’), in plaats van de in het Westen gebruikelijke probleemoplossingen als eenmalige acties. Vandaar de in Japan gebruikelijke utopische doelstellingen zoals ‘zero defects’, ‘just-in-time’, ‘zero stock’, en dergelijke. Tevens valt op dat geen melding wordt gemaakt van kwantitatieve modellen of algorithmen. De toepassing vond vooral plaats in de autoindustrie met Toyota als voortrekker; nu vindt uitbreiding naar andere industriële sectoren plaats.

TPM is uitvoerig door Nakajima beschreven^{6, 7}.

6. Het TUE-onderhoudsmodel

Nagenoeg vanaf de start van de faculteit Technische Bedrijfskunde medio zesti-

ger jaren is onderhoud opgenomen in het onderwijsprogramma, waarbij velen in afstudeerprojecten een bijdrage leverden aan het onderzoek, dat na een verkennende fase in de zeventiger jaren een vast onderdeel werd in het onderzoeksprogramma en ook in de eerste voorwaardelijke financiering werd opgenomen.

Zowel om bedrijfskundige deekennis in een totaal verband met elkaar te brengen, alsook om jaarlijks de stand van zaken te kunnen vaststellen bij het bepalen van de onderzoeksprioriteiten werd een het onderhoud in zijn totaal omvattend model ontwikkeld, waarin de onderhoudsfunctie wordt beschreven door middel van de te onderscheiden subfuncties in samenhang^{8, 9}.

Het model is descriptief en niet prescriptief, omdat de diversiteit in situaties in de werkelijkheid vereist dat onderscheid wordt gemaakt in de kenmerken van een situatie, die bepalend zijn voor het onderscheid dat moet worden gemaakt in de toe te passen methoden in de beheersing der deelfuncties.

7. Het TUE-onderzoek

In een eerdere analyse¹ werd als belangrijkste bevindingen het volgende geconcludeerd:

- in de gebruikelijke onderhoudstheorie ontbreekt aandacht voor de toepassing van toestandsafhankelijk onderhoud, en voor de plaats die het inneemt in de bepaling van het onderhoud dat uitgevoerd dient te worden. De bestaande theorie was fragmentarisch;
- de planning en besturing in het onderhoud correspondeert met de planning en besturing als toegepast in de produktiebeheersing (N.B. niet te verwarren met de fabricagebeheersing). Toepassing zonder meer was echter niet mogelijk omdat het onderhoudsproces een aantal kenmerken heeft die het productieproces niet in die mate kent, in het bijzonder de aan het onderhoud inherente onzekerheid;
- de voorraadbeheersingstheorie, die hoofdzakelijk is gebaseerd op statistische modellen, voorziet voor slechts een kleine en bovendien enigszins triviale categorie onderdelen in de beheersing van onderhoudsvoorraden. Substantiële aanvulling van de bestaande kennis is vereist en vergt nader onderzoek.

Bij de beperkte onderzoekscapaciteit die ter beschikking stond moesten keuzen worden gemaakt. Prioriteit werd gegeven aan het onderzoek naar de wijze waarop systematisch kon worden bepaald wanneer welk onderhoud aan een technisch systeem moest worden uitgevoerd. Dit berustte op de overweging dat het voor de hand ligt eerst aandacht te richten op de wenselijkheid van uit te voeren acties, in plaats van eerst op de ideale beheersing van activiteiten waarvan een aanmerkelijk deel overbodig is. Op dit onderdeel werden tientallen onderzoeken

door afstudeerders in een diversiteit van bedrijven voor een diversiteit van objecten uitgevoerd. De resultaten werden in een raamwerk gevat in het promotie-onderzoek van Gits³. Enige mathematische aspecten werden door Geurts onderzocht¹⁰.

Inmiddels is die kennis omgezet in een vorm waarin wordt beschreven op welke wijze het systematisch ontwerpen van het onderhoudsconcept voor een technisch systeem uit te voeren in de praktijk. Reeds enige honderden namen deel in een daarover door medewerkers van de onderzoeksgroep verzorgde drie-daagse cursus, georganiseerd door Studiecentrum voor Bedrijf en Overheid.

De planning en besturing werd op onderdelen onderzocht, maar vraagt nog aanzienlijk meer inspanning om geordend te worden in een raamwerk waarin de instrumentele mogelijkheden kunnen worden ondergebracht. Hierbij kunnen vooraf apart te onderzoeken sectoren worden geïndiceerd, te weten:

- groepen van kleine, relatief goedkope objecten.

De hierbij toe te passen methode is in beginsel bekend onder benamingen als 'group replacement' en 'block replacement'.

- algemene centrale onderhoudswerkplaatsen.

Deze situatie is in de productie-beheersing bekend als job-shop, waarbij de orderstructuur een netwerk is. De hierbij optredende problemen door de dynamische interrelaties van netwerken zijn voor beide gevallen typerend en houden niet te vermijden onzekerheden op in de planning en in de besturing.

- specialistische centrale onderhoudswerkplaatsen.

De planning en besturing in deze situatie is hier voor componenten, vergeleken met de andere onderhoudssituaties, relatief eenvoudiger doordat de beperking in het assortiment gepaard gaat met een relatief hoge herhalingsgraad. Voor de lange termijnplanning van het onderhoud van groepen gelijksoortige complexe objecten werd reeds eerder een model ontwikkeld en toegepast^{1, 11}.

- grote onderhoudsbeurten.

Grote onderhoudsbeurten kenmerken zich door hun zeer groot aantal activiteiten, die in een kort tijdsbestek moeten worden uitgevoerd en waarin het belang domineert van een korte doorlooptijd. De bestaande netwerkplanning-methoden, ontwikkeld voor productie, schieten op een aantal vitale onderdelen tekort. Onderzoek in het onderhoud is enige tijd geleden gestart, een publicatie over de eerste bevindingen is in voorbereiding.

- onderhoud op de werkvloer.

Het onderhoud op de werkvloer draagt de typische kenmerken van de job shop. De beheersing door middel van prioriteitsregels bekend uit de productiebeheersing biedt weinig soulaas door de onzekerheid over de afloop van de individuele orders. Het ligt voor de hand hiervoor periodenplanning¹² toe te passen. Nader onderzoek is daarvoor nodig.

Ondanks de zeer grote voortdurende stroom van standaardprogramma's voor de

onderhoudsbeheersing, universeel geldend gepresenteerd, is hun bruikbaarheid teleurstellend. De gebruikelijke evaluatiemethoden zijn gebrekkig.¹³ Voor een juist oordeel is materiekennis, dat wil zeggen kennis van onderhoudsbeheersing, en niet informaticakennis, een eerste voorwaarde. Hoe de informatiebehoefte in een concrete situatie systematisch vast te stellen is een onderwerp van lopend promotie-onderzoek.

De voorraadbeheersing in het onderhoud vereist het onderscheiden van het assortiment in op een verschillende manier te beheersen categorieën^{1, 14}. In het kader van afstudeeronderzoek ontwierp Niëns een methode voor de toewijzing van een artikel aan zijn beheersingscategorie¹⁵.

Het kernprobleem in de beheersing ligt bij de artikelen met een lage tot zeer lage vraag^{1, 14}.

8. Toekomst

We beschikken thans over ruime kennis over de beginselen van het onderhoud en over onderhoudsplanning en -besturing. Verdieping betreft in het bijzonder de informatieverwerking ter ondersteuning van de beslissingsprocessen.

Verbeteringen in het onderhoud zullen voor een groot deel zijn gebaseerd op betere ontwerpen. Dit wordt mede bevorderd door de nieuwe eisen die flexibele produktiesystemen bij de just-in time benadering aan het onderhoud stellen. In grote lijnen kunnen de volgende trends worden gesignaleerd¹⁶:

- De betrouwbaarheid van componenten zal nog aanzienlijk toenemen. Statistische analyse van storingsintervallen wordt daardoor minder en minder effectief.
- Periodiek, gebruiksduurafhankelijk onderhoud in relatie tot storingen zal drastisch afnemen, terwijl toestandsafhankelijk onderhoud zal gaan domineren.
- Toestandsmeting en -vergelijking zal in sterk toenemende mate door ‘process control’ automatisch worden uitgevoerd
- Met de automatisering van toestandsafhankelijk onderhoud zal in plaats van meting, in-situ-meting en voorlopige analyse plaatsvinden, door centralisatie van het meetresultaat (telemonitoring).
- De druk op korte stilstandstijden bij storing zal leiden tot meer toepassing van modulaire constructies, waarbij eenvoudige ‘go-no go’ testen voor functio-

nele componenten gepaard gaat met snelle en eenvoudige vervanging. Reparatie van defecte componenten zal, waar economische interessant, vooral in gespecialiseerde werkplaatsen plaatsvinden.

- Zowel als gevolg van de verlaging van de storingsgraad, als door de eis snelle te reageren op een storing, zal het vast geplande periodiek onderhoud een minderheid worden in de werklust, waardoor de onderhoudsplanning en -besturing meer zal gaan lijken op de wijze waarop snel reagerend op de individuele vraag de inzet van taxi's wordt beheerst.
- Met de toenemende concentratie van de aandacht op de kern van de ondernemingstaak zal onderhoud meer en meer worden uitbesteed, terwijl tegelijkertijd de onderhoudstoelevering zich als bedrijfstak met 'co-maker' relaties zal gaan ontwikkelen.
- Vooral in situaties waarin calamiteiten kunnen optreden, onder andere als gevolg van grote energievolumes, chemische en nucleaire processen, zal de storingsanalyse ter preventie van storingen zich van het onderzoek van bijna ongevallen gaan bedienen als een normaal gebezigd instrument.

Literatuur

1. Geraerds, W.M.J., 'Towards a theory of maintenance', p. 297-329 in: R. Bureau ed., *The Organization of Logistic Support Systems*. The English University Press Ltd., London, 1972, 593 pp.
2. Geraerds, W.M.J., 'Toestandsafhankelijk onderhoud. Principe, technieken, beperkingen'. *PT/Werktuigbouw* 37 (1982) nr. 5, pp. 38-41.
3. Gits, C.W., 'On the maintenance concept for a technical system. A framework for design'. Dissertatie TUE, Eindhoven, 1984, 122 pp.
4. Blanchard, B.J., 'Design and maintenance to Life Cycle Cost'. M/A Press, Portland, 1978, 255 pp.
5. Geraerds, W.M.J., 'Het terotechnologisch model'. In: 'Onderhoudsmanagement. Handboek voor technische en onderhoudsdiensten', Samsom, Alphen aan den Rijn, 1987, pp. B3020, 1-22.
6. Nakajima, S., 'Introduction to TPM'. Productivity Press, Cambridge MA, 1988, 129 pp.
7. Nakajima, S., 'TPM Development Program'. Productivity Press, Cambridge MA, 1989, 403 pp.
8. Geraerds, W.M.J., 'Het TUE-onderhoudsmodel'. In: 'Onderhoudsmanagement. Handboek voor technische en onderhoudsdiensten', Samsom, Alphen aan den Rijn, 1987, pp. B3010, 1-11.
9. Geraerds, W.M.J., 'The EUT Maintenance Model'. In: H.E. Bradley, 'Operational Research '90', IFORS Conference, Athene 25-29 Juni 1990, Pergamon Press, New York, 1991, pp. 629-638.
10. Geurts, J.H.J., 'On the selection of elementary maintenance rules'. Dissertatie TUE, Eindhoven, 1986, 115 pp.
11. Geraerds, W.M.J., 'LTP-Beheersingssysteem voor motorisch aangedreven gronduitrusting'. *Mededelingen Operationele Research*, 6 (1967), pp. 175-196 en 245-272.
12. Martin, H.H., 'Evaluation methods of standard software'. 21 pp. in: Congress Proceedings 'Maintenance Management', I.I.R., Toronto, June 28-29, 1989.
13. Geraerds, W.M.J., 'Productiebeheersing en bedrijfskunde. Naar samenhang'. *Intreerede THE*, Eindhoven, 1973, 20 pp.

14. Geraerds, W.M.J., 'Typische aspecten van de voorraadbeheersing in het onderhoud'. pp.1-19 in NVDO Congresverslag 'Voorraadbeheer bij de Technische Dienst', Eindhoven, 1982.
15. Niens, R.M.J., 'De systematische indeling van reservedelen in voorraadbeheersingscategorieën'. Afstudeerrapport THE, Eindhoven, 1983, 48 pp.
16. Geraerds, W.M.J., 'Maintenance – Development, State of the Art, Future'. 14 pp. in: Congress Proceedings 'La Maintenance Industrielle', I.I.R., Parijs, 5-6 December 1990.

Inleiding tot het thema van de studiedag

3

Dr.ir. J.H.J. Geurts

Het volledige motto van de studiedag ter gelegenheid van het afscheid van prof.ir. W.M.J. Geraerds van de Technische Universiteit Eindhoven luidt: 'Onderhoud en Logistiek: op weg naar integrale beheersing'. Dat suggereert al dat de studiedag zich richt op de toekomst, of tenminste op wat er nu nodig is om de ideale toekomst dichterbij te brengen. Die toekomst zal natuurlijk mede bepaald worden door het verleden, door waar wij op het huidige punt in de tijd zijn aangeland.

Onderhoud hield aanvankelijk voornamelijk in: het reconditioneren van ondeugdelijk geworden gereedschap; het *wat* te doen om een onbruikbaar geworden gereedschap weer bruikbaar te maken.

Met het gecompliceerder en kostbaarder worden van fabricageapparatuur en productieprocessen kwam de vraag naar de mogelijkheid van preventie van storingen naar voren en daarmee de vraag naar *wanneer* de daartoe strekkende werkzaamheden zouden moeten worden uitgevoerd.

Dat wil zeggen dat onderhoud, net zoals productie, steeds meer gezien werd als een te beheersen proces. Het vakgebied onderhoudsbeheersing ontstond; een gebied waarop Geraerds een van de coryfeeën is.

De huidige gang van zaken houdt veelal in dat de productieve functie in een bedrijf ervan uitgaat dat ze gedurende vastgestelde tijden de ongestoorde beschikking heeft over goed functionerende fabricage-apparatuur; de opgave aan productiebesturing is: van die tijd zo goed mogelijk gebruik te maken.

De onderhoudsfunctie moet dan dit uitgangspunt waar zien te maken in de haar ter beschikking gestelde tijd en tegen beperkte kosten. Kortom, er lijkt tussen onderhoud en productie een relatie te bestaan als die tussen leverancier en klant. Verderop zal ik betogen dat die relatie veel meer op een 'comakership'-relatie zal moeten gaan lijken.

Dat er, vooral met de huidige geavanceerde fabricageapparatuur, ondanks alles toch nog wel eens ongeplande onderbrekingen van de veronderstelde gereedheid optreden is iets waar de produktiebeheersingsfunctie niet altijd expliciet rekening mee houdt de onderhoudsbeheersingsfunctie daarentegen wel.

De onaangename verrassingen – onaangenaam zowel voor produktie als voor onderhoud – die worden gevormd door ongeplande produktieonderbrekingen waren tot voor kort veelal nog wel op te vangen door fabricagecapaciteit op te slaan in buffers, in de vorm van voorraden van produkten in min of meer gevorderde staat van bewerking. Deze buffers ontstonden toch al vaak als gevolg van de manier waarop het produktieproces meestal was georganiseerd, namelijk functioneel of bewerkingsgericht, hetgeen dan leidde tot bewerking in series, waarvan de grootten ‘optimaal’ heetten te zijn.

De met deze manier van produceren gepaard gaande betrekkelijk lange, en niet altijd even betrouwbare levertijden waren overkomelijke bezwaren, immers markten waren vrij stabiel en produkten hadden een vrij lange levenscyclus.

De situatie is nu grondig aan het veranderen, zodat de toekomst er anders zal uitzien. In dynamische markten van produkten met steeds kortere levenscycli zijn korte en betrouwbare levertijden van het grootste belang. Voor de fabricage wordt daarom steeds meer gebruik gemaakt van produktgerichte strak gekoppelde (bufferloze) fabricagestappen die dan ook nog eens in het ideale geval met seriegrootte één moeten produceren.

Onder deze omstandigheden is, vanwege de afwezigheid van buffers, het ongepland niet-gereed zijn van een fabricagestap een veel groter probleem dan vroeger, en leidt het over het algemeen direct tot onbetrouwbaarheid en verhoging van doorlooptijden en daarmee, bij afwezigheid van speciale maatregelen, direct tot verlate afleveringen.

Zoals de produktie steeds meer ‘just-in-time’ moet worden, zo zal ook het onderhoud steeds meer ‘just-in-time’ moeten worden.

Er zijn in principe twee mogelijkheden om aan het probleem van niet-geplande stilstanden het hoofd te bieden: elimineer ze (1) of minimaliseer de gevolgen en leer met de resterende ellende te leven (2).

1. Elimineren van niet-geplande machinestilstanden betekent: ofwel stilstanden zelf volkomen elimineren, ofwel ze veranderen in geplande stilstanden.

Het volkomen elimineren van stilstanden lijkt een utopie, het zal dus wel op het planbaar maken van stilstanden moeten neerkomen. Toestandsafhankelijke onderhoudsconcepten, wellicht modificaties van de fabricageapparatuur vereisend, zullen de sleutel moeten geven tot het benaderen van dit doel: het ‘just-in-time’-onderhoud.

Ook al zou op die manier al het onderhoud planbaar worden, het zou zich toch op variabele tijdstippen voordoen.

2. Het minimaliseren van gevolgen van ongeplande stilstanden vereist dat zowel productie als onderhoud expliciet rekenen op het optreden van verrassingen in de vorm van ongeplande stilstanden en dan dus ook expliciet mogelijkheden creëren, om aan de gevolgen ervan het hoofd te bieden.

Zowel in geval (1) als in geval (2) is dus flexibiliteit nodig dat wil zeggen: vermogen tot opvangen van (korte termijn) variaties op langere termijn plannen. Dat vermogen wordt, waar het is bedoeld om aan variaties ten gevolge van een en dezelfde oorzaak het hoofd te bieden, het beste beheerd door één instantie.

Ik voorzie dan ook een steeds sterkere integratie tussen productiebeheersing en onderhoudsbeheersing, en waarschijnlijk ook tussen productie-uitvoering en onderhoudsuitvoering, totdat er wellicht uiteindelijk een functie ontstaat voor het beheersen van de bezetting van de aanwezigheidstijd van fabricageapparatuur, die dan natuurlijk met een Engelse term bijvoorbeeld het '*utilization management*' zou kunnen heten.

De analogie met de al lang ingeburgerde functie 'materials management' zal duidelijk zijn.

De volgende voordrachten zullen verschillende aspecten van een noodzakelijk geachte integratie van productie- en onderhoudsbeheersing belichten.

Stal schetst als uitgangspunt een breed beeld van de omstandigheden waaronder moderne fabricageapparatuur wordt bedreven en de (onderhouds-)problemen die men daarbij tegenkomt.

Bertrand analyseert vervolgens de samenhang tussen niet-constante gereedheid van fabricageapparatuur en de beheersing van productieprocessen.

Jardine beschouwt de integrale produktieve functie van een produktiesysteem en ziet het als een inkomsten-genererend mechanisme dat uitgaven behoeft, onder andere voor zijn instandhouding. Hij zoekt maatregelen die ervoor moeten zorgen dat de netto inkomstenstroom over de lange termijn wordt gemaximaliseerd.

Christer geeft de rol aan van productie- en onderhoudsmensen in het modelleringsproces van de uitgaven en inkomsten.

Kwantitatieve modellen van de samenhang tussen die twee zijn nodig om het effect van maatregelen, die bedoeld zijn als verbeteringen van het onderhoud, te kunnen evalueren op integraal niveau.

Sherwin tenslotte wijst mogelijkheden aan tot integratie van 'just-in-time' productiebeheersingsideeën en toestandsafhankelijk onderhoud.

Als het ons lukt van die mogelijkheden gebruik te maken zullen we, ondanks feilbare fabricageapparatuur, het ideaal van justin-time productie dichterbij kunnen halen.

4

Dit artikel dient als inleiding op de voordracht van Ir. C.H.P. Stal; het is in overleg met hem onder supervisie en redactie van ir. H.H.Martin en B.A.H.M. Bogers tot stand gekomen.

Aandacht zal worden besteed aan de organisatie van het onderhoud bij een middelgroot bedrijf 'Stork Brabant'.

Ter verduidelijking zal alvorens op diverse ontwikkelingen, of uitdagingen, in te gaan eerst een korte schets worden gegeven van het bedrijf. Enkele ontwikkelingen die in de belangstelling staan zullen apart worden besproken.

Mede als gevolg van de reactie op de geschetste ontwikkelingen zal tenslotte het zeer fundamentele probleem met betrekking tot de grootte van de onderhoudsafdeling en de visie van het bedrijf hierop worden besproken.

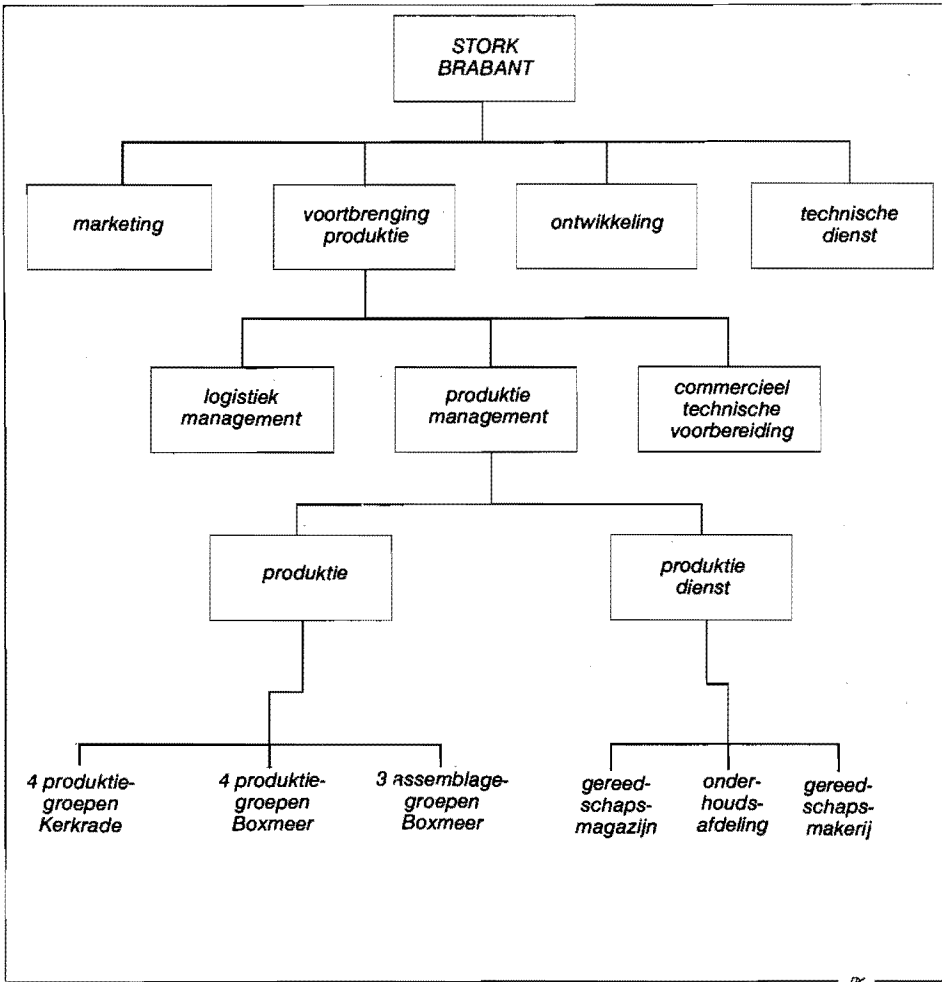
1. Inleiding

- Het bedrijf

Stork Brabant is één van de 85 autonome werkmaatschappijen van Stork N.V. Men vervaardigt hoogwaardige machines voor het bedrukken en veredelen van textiel, in vestigingen in Kerkrade (plaatbewerkingen) en Boxmeer (verspanende bewerkingen en assemblage). Het voornaamste produkt is de textielzeefdrukmachine. Hiervan worden er per jaar 60 tot 70 gemaakt, met elk een verkoopwaarde van 1,5 à 2 miljoen gulden.

Daarnaast worden automatische verfkeukens (voor het mengen van verf), stomers (voor het wasecht maken van bedrukt textiel) en coating machines (voor nabehandelingen van textiel) vervaardigd

Stork Brabant is – met een marktaandeel van 50% op de wereldmarkt – marktleider in deze branche. In beide vestigingen zijn 800 mensen werkzaam; waaronder 200 medewerkers ten behoeve van de produktie en 10 personen voor het onderhoud van de primaire produktiefaciliteiten (7 in Boxmeer, 3 in Kerkrade).



Figuur 1

Stork Brabant beschikt over een eigen marketing organisatie, een ontwikkel- en researchafdeling en een productieorganisatie. In de productieorganisatie zijn drie hoofdtakken te onderscheiden:

- de afdeling Commercieel Technische Voorbereiding, waar ontwerpen en tekeningen vertaald worden naar de eisen voor productie en inkoop;
- de afdeling Logistiek Management;
- de afdeling Productie Management.

Deze afdeling Productie Management bestaat uit: een afdeling Productie waar vier groepen voor *plaatbewerkingen* (Kerkrade), vier groepen voor *verspanende bewerkingen* en drie *assemblage-groepen* (allen in Boxmeer) zijn ondergebracht.

Tevens ressorteren hieronder de afdelingen Produktie Dienst waar de verantwoordelijkheid voor *gereedschapmagazijn* is ondergebracht, de *gereedschapmakerij* en de afdeling *onderhoud*.

De afdeling Onderhoud is verantwoordelijk voor het uitvoeren van onderhoud aan de primaire produktiemiddelen en het gereedschap. Daarnaast is er een Technische Dienst, die zorg draagt voor het onderhoud van de 'secundaire' produktiefaciliteiten, zoals gebouwen, verwarming, heftrucks en dergelijke.

– *De onderhoudsafdeling*

Ten aanzien van het onderhoud heeft men bij Stork de volgende doelstellingen geformuleerd:

- het op peil houden respectievelijk verhogen van de gereedheid van met name die produktiemiddelen die een bottleneck vormen in het productieproces
- een hoge kwaliteit van het eindprodukt is voor het behouden c.q. versterken van de concurrentiepositie van groot belang. Het hanteren van strenge kwaliteitseisen in de productie is derhalve noodzakelijk. Het onderhoud heeft als doel ervoor zorg te dragen dat de hoge kwaliteitseisen van de te produceren delen kan worden gewaarborgd. Prioriteit in het onderhoud wordt altijd aan de primaire produktiefaciliteiten gegeven.
- het voorkomen van milieuschadelijke effecten.

Bij Stork past men groepentechnologie toe bij de vervaardiging van onderdelen. Er zijn vier groepen verspanende bewerkingen te onderscheiden, waarbij de meeste machines redelijk universeel zijn en sommige, de bottleneck machines, niet.

De primaire produktiemiddelen omvatten allerlei technisch geavanceerde apparatuur, waaronder:

- 15 stand alone CNC's
- 30 conventionele machines
- 40 lasapparaten
- een flexibel fabricage systeem (FMS)
- een geautomatiseerde voorbehandelingsstraat en spuitrij.

Ondanks de ambitieuze doelstellingen en het uitgebreid en complexe machinepark is de onderhoudsafdeling van Stork Brabant relatief klein, zeker in vergelijking met de onderhoudsafdelingen van vaak enkele honderden personen, zoals gebruikelijk is in de chemische industrie.

Zo zijn er slechts tien medewerkers voor het onderhoud van de primaire produktiemiddelen verantwoordelijk; zeven monteurs kunnen uitsluitend werktuigkundige werkzaamheden verrichten en drie monteurs zijn ook electrotechnisch geschoold.

Daarnaast worden een aantal eenvoudige onderhouds-activiteiten door machine-

operators zelf uitgevoerd. Men kan hierbij denken aan smeringen en het signaleren van storingen (in het totaal niet meer dan 5% van alle onderhoudsactiviteiten).

Aangezien de meeste produktiemiddelen multifunctioneel zijn en vaak een lage bezettingsgraad hebben (met uitzondering van de bottle-neck machines) is het in veel gevallen mogelijk om bij grotere storingen uit te wijken op andere machines zodat schade aan de produktie-voortgang beperkt blijft tot het extra omstellen.

Mocht ondanks alles toch de produktievoortgang in gevaar komen dan kan men de meeste produktiewerkzaamheden ook uitbesteden. Het uitbesteden van werkzaamheden is overigens bij Stork Brabant geen uitzondering; 50 % van alle produktiewerkzaamheden worden extern door derden uitgevoerd.

Om de consequenties van storingen verder terug te dringen zijn ook externe leveranciers aangetrokken om de benodigde delen te kunnen leveren, als de bottleneck-machine ten gevolge van een storing stil ligt.

Deze 'terugval-strategie' is met name van belang als een nieuwe technologie (bijvoorbeeld het FMS) technisch nog niet is uitgerijpt.

- De produktieplanning

De produktieplanning bij Stork Brabant geschiedt op drie niveaus. Het hoogste niveau is dat van het Hoofd Produktie Plan met een horizon van negen perioden van vier weken. Het plan is gebaseerd op verkregen klantenorders en verkoopprognoses, en wordt elke vier weken door de direktie bijgesteld. Hieruit kan men een grof bezettingsoverzicht afleiden voor de verschillende produktiegroepen. Op basis van dit overzicht worden elke week orders aan de produktiegroepen ingepland en vrijgegeven. Daarbij wordt een bepaald percentage (op basis van ervaring) vrij-gepland, ten behoeve van spoedorders en onderhoud. De produktiegroep hanteert een planningshorizon van zes weken en moet elke vrijgegeven order binnen drie weken afwerken. De fijnplanning wordt aan de produktiegroep zelf overgelaten.

Opgemerkt kan nog worden dat de assemblage geheel op klantenorder geschiedt en dat de onderdelenfabrikage voor een groot gedeelte nog is voorraadgestuurd.

- De onderhoudsplanning

Het onderhoud dat bij Stork Brabant routinematig wordt gepland bestaat voornamelijk uit gebruiksduurafhankelijk onderhoud. In hoofdzaak zijn deze activiteiten de zogenoemde jaarlijkse grote beurten aan de FMS, lasersnijmachines, 3-D meetmachines en een aantal CNC's, en dergelijke, die dan een aantal dagen tot één week stil liggen, en klussen zoals smeren van machineonderdelen (klein preventief onderhoud), die ongeveer een halve dag in beslag nemen.

Dit geplande onderhoud maakt niet meer dan 25% uit van de totale werklast van

de onderhoudsafdeling, de overige 75% bestaat uit storingsafhankelijk onderhoud.

– *De afstemming tussen onderhoud en produktie*

Voor storingsafhankelijk onderhoud wordt in elke groep een gemiddeld percentage vrijgepland. Als een storing aan een bepaalde machine optreedt op een ongunstig moment kan men kiezen uit:

- overwerken
- uitwijken naar een andere machine in dezelfde groep, of een daar buiten
- uitbesteden, of de produktieplanning aanpassen; in die zin dat men kan besluiten tot deelleveringen.

Dit laatste is mogelijk omdat een groot gedeelte van de onderdelen-fabrikage, zoals reeds eerder opgemerkt, nog voorraadgestuurd is, waardoor vaak niet de gehele order ineens nodig is.

Een grote beurt voor een machine is eenvoudig ruim van tevoren te plannen. Dit gaat in overleg tussen *onderhoud*, *produktie* en *logistiek*. In een dergelijke situatie worden minder orders ingepland of wordt een gedeelte uitbesteed.

Het klein preventief onderhoud wordt gepland in overleg tussen *onderhoud* en de betreffende groepsbaas. Hiervoor bestaat in de groep voldoende regelmogelijkheid doordat, zoals al gezegd, de groep niet 100% is volgepland en elke produktieorder, die gemiddeld een paar uur bewerkingstijd vraagt, een interne doorlooptijd heeft van drie weken.

2. Uitdagingen in het onderhoud

De huidige opzet van de onderhoudsafdeling – de Technische Dienst – en de wijze waarop onderhoudsactiviteiten worden beheerst, wordt door Stork als bevredigend ervaren, en is ook niet ongewoon bij een produktieproces met een groepen technologische opstelling van de machines en de produktie van kleine series. Toch zijn er – deels autonome – ontwikkelingen, die speciale aandacht vragen. Een aantal belangrijke ontwikkelingen zullen hieronder kort worden beschreven.

– *De kleine onderhoudsafdeling*

Aangezien de onderhoudsafdeling voor beide vestigingen in het totaal uit slechts tien personen bestaat, kunnen veel activiteiten in een ‘informele’ sfeer worden geregeld. Het heeft waarschijnlijk ook geen zin om strikte procedures op te zetten die een grote flexibiliteit van de onderhoudsafdeling zou kunnen bedreigen. Een informele werkwijze heeft echter als nadeel dat weinig informatie beschik-

baar is, om het functioneren van de afdeling te kunnen analyseren en eventueel te verbeteren.

– *De technologische vooruitgang*

Bij Stork Brabant wordt in het productieproces gebruik gemaakt van technologisch geavanceerde machines. Uit concurrentieoverwegingen is het regelmatig moderniseren van het machinepark een noodzakelijkheid. In toenemende mate speelt zich technologische vernieuwing af op het terrein van de (micro)-electronica en de besturingslogica (software) van de apparatuur. Om in het onderhoud het hoofd te kunnen bieden aan storingen, die in deze gebieden liggen, schiet de traditionele werktuigbouwkundige en electrotechnische kennis tekort. Ook al behoeven de gebreken in de besturingslogica en de storingen in de electronica niet door de onderhoudsafdeling zelf opgelost te worden, zo is toch een goed begrip van deze nieuwe materie van groot belang om juiste conclusies te kunnen trekken met betrekking tot de gehanteerde onderhoudsregels.

– *Meer onderhoudsspecialisten*

Gezien de toegenomen technologische diversiteit zijn er ook in het onderhoud meer specialismen nodig. Voor kleine onderhoudsafdelingen is echter een versnippering naar specialismen nogal kostbaar en vooral riskant. Het wordt steeds moeilijker om aan een wisselende vraag naar onderhoud te voldoen en daarbij toch een goede bezettingsgraad van de onderhoudsafdeling te bereiken. Tevens ontstaat er een toenemende afhankelijkheid van deze specialisten (bij een 'gedwongen' specialisering).

Uit beheersingsoogpunt zou juist een omgekeerde situatie voordeliger zijn, namelijk: flexibiliteit door de inzet van multi-skilled personeel.

– *De kosten van onderhoud*

Het is doorgaans niet moeilijk om de kosten van onderhoud vast te stellen; de feitelijke baten daarentegen zijn slechts – ten dele kwantificeerbaar.

In traditionele budgetteringssystemen wordt hier geen rekening mee gehouden. Vaak leidt dit dan tot een situatie waarin het moeilijk is om de uitgaven financieel te verantwoorden, waardoor een neiging vanuit het management bestaat, om het onderhoudsbudget te verkleinen, omdat men uit principe uitgaat van verspilling in het onderhoud.

– *Onderhoud van secundaire produktiemiddelen*

Een bijzondere plaats bij het onderhoud nemen de secundaire produktiemiddelen in, dat door de afdeling 'Technische Dienst' wordt uitgevoerd. Anders dan de

primaire produktiemiddelen dienen de secundaire middelen als ondersteuning van het productieproces. De technologie van secundaire middelen is – in vergelijking tot de primaire produktiemiddelen – nog meer divers. Transportsystemen (heftrucks, embalage-installaties, en dergelijke) en klimaatbeheersingssystemen, gebouwen en groenvoorzieningen vallen onder deze categorie.

In een aantal gevallen zijn bij de aanschaf 'kleine' investeringen gemoeid, waarbij men dan, veelal ten onrechte, een geringer belang van de investering voor het productieproces veronderstelt. Door deze houding krijgen secundaire produktiemiddelen bij het onderhoud vaak minder prioriteit.

3. Hoe groot mag een onderhoudsafdeling zijn?

Gezien de ontwikkelingen die hier boven zijn geschetst komt al snel de vraag op: hoe groot mag een onderhoudsafdeling zijn? en heeft het behouden van een eigen onderhoudsafdeling (in de toekomst) nog wel zin?

Reeds nu al wordt in het onderhoud gebruik gemaakt van 'diensten van derden' (o.a.: Stork Mufac en sommige leveranciers van productiemiddelen). Bij Stork hanteert men met betrekking tot het beleid over uitbesteden dat preventief gerichte onderhoudsactiviteiten hoofdzakelijk worden uitbesteed aan de 'original equipment manufacturer' (OEM).

De eigen onderhoudsafdeling wordt meer gericht op het opheffen van storingen, waarbij een korte reactieïjd nodig is, en men niet kan wachten op een externe specialist.

– *De samenstelling en variëteit van een onderhoudsafdeling*

Als de grootte van een onderhoudsafdeling bepaald moet worden, waarmee bedoeld wordt op het aantal personeelsleden in de onderhoudsafdeling, moet in ieder geval onderscheid worden gemaakt in het benodigd aantal disciplines.

Dit aantal hangt af van de technologische diversiteit van de activiteiten, die bij een onderhoudsafdeling worden ondergebracht⁷. Er moet dan wel mee rekening worden gehouden dat ook produktiemedewerkers voor eenvoudige onderhoudswerkzaamheden kunnen worden ingezet. Hierdoor stijgt de bezettingsgraad van dit personeel; hun 'idle-time' wordt opgevuld met onderhoudswerkzaamheden. Bij Stork Brabant worden zo medewerkers van de gereedschapmakerij en productie-medewerkers voor bepaalde eenvoudige onderhoudsactiviteiten ingezet.

Elke discipline vormt een eigen capaciteitsgroep. Zoals reeds eerder is gesignaleerd geldt, dat als de onderhoudsafdeling veel verschillende capaciteitsgroepen kent, dit nadelige gevolgen kan hebben voor de bezettingsgraad van het personeel hiervan. Er zal immers een zekere speling voor elke capaciteitsgroep moeten worden ingebouwd om het wisselende werkaanbod te kunnen opvangen.

Bij een kleiner aantal capaciteitsgroepen, en een in volume gelijk werkaanbod, zou een kleinere speling (lees: overcapaciteit) mogelijk maken.

In theorie zou men de bezettingsgraad kunnen verhogen als het aantal groepen kan worden verminderd, door onderhoudspersoneel uit de ene capaciteitsgroep te scholen in het uitvoeren van activiteiten van een andere groep (bij voorkeur eenvoudiger werk). Dit staat bekend als het opleiden van multi-skilled personeel. Hierdoor wordt ook de coördinatie tussen de verschillende groepen eenvoudiger.

De werklast van een onderhoudsdienst

De werklast van een onderhoudsdienst wordt bepaald door: de hoeveelheden storingsafhankelijk onderhoud (SAO), gebruiksduurafhankelijk onderhoud (GAO) en toestandsafhankelijk onderhoud (TAO) dat in het onderhoudsconcept is vastgelegd⁴.

Storingsafhankelijk onderhoud bestaat uit puur correctief onderhoud (CO), terwijl gebruiksduurafhankelijk en toestandsafhankelijk onderhoud bestaan uit: preventief onderhoud (PO) en een klein gedeelte correctief onderhoud.

Binnen het correctief onderhoud vallen te onderscheiden:

- spoed correctief onderhoud en
- uitstelbaar correctief onderhoud.

Binnen het preventief onderhoud kunnen we onderscheid maken tussen:

- enerzijds preventief onderhoud, aan essentiële en niet essentiële technische systemen, en
- anderzijds tussen *routine* preventief onderhoud, dat vaak online (zonder machinestilstand) uitgevoerd kan worden; *klein off-line* preventief onderhoud, dat korte tot middellange machinestilstand vereist en vaak tijdens het omstellen kan gebeuren; en *groot off-line* preventief onderhoud, dat lange(re) machinestilstand vereist die meestal elk afzonderlijk wordt ingepland.

Tenslotte wordt de werklast mede bepaald door de vraag naar modificatie. Hoewel dit strikt genomen geen onderhoud is wordt hiervoor soms gebruik gemaakt van capaciteit van de onderhoudsdiensten. Hiermee moet bij het bepalen van de benodigde werklast derhalve wél rekening worden gehouden.

Stork Brabant onderkent:

- gebruiksduurafhankelijk onderhoud (GAO) in de vorm van grote beurten voor de voornaamste machines,
- klein preventief onderhoud, alsmede
- storingsafhankelijk (SAO).

Modificatie wordt niet door de onderhoudsafdeling uitgevoerd, maar in zijn totaliteit aan de leveranciers uitbesteed.

Het werklastpatroon van een onderhoudsdienst

De verhouding tussen correctief- en preventief onderhoud bepaalt het patroon van de werklast, en vloeit voort uit het onderhoudsconcept waarover op managementniveau beslist wordt⁵. Stork Brabant hanteert op dit moment nog geen expliciet onderhoudsconcept, hoewel men dit wel 'wenselijk' acht. Dit concept zal dan moeten worden opgesteld door de hoofden van Productie Management en Productie Dienst samen en moeten worden geaccordeerd door het hoofd van de voortbrengingsorganisatie. Op dit moment resulteert het impliciete onderhoudsconcept in hooguit 25% *preventief onderhoud*; de rest is *correctief onderhoud*.

Overigens wordt op dit moment nagedacht over hoe men meer preventief onderhoud kan uitvoeren. Hiervoor is een werkgroep *Outillage* opgericht, met vertegenwoordigers uit meerdere werkmaatschappijen van Stork N.V. Er wordt vooral gezocht naar mogelijkheden voor *toestandsafhankelijk onderhoud*. Dit streven wordt voornamelijk ingegeven doordat ook de onderdelenfabrikage steeds meer op klantenorder zal worden gestuurd.

De in de Operations Research veel gepropageerde optimalisatie-modellen, waarmee men het optimale percentage preventief onderhoud zegt te kunnen berekenen, is daarvoor overigens nietbruikbaar omdat meer preventief onderhoud niet ongelimiteerd tot storingsvermindering leidt, en de mathematische modellen die men hiervoor moet kennen niet analytisch kunnen worden bepaald³.

Verder is ook het type bedrijf van invloed op het patroon van de werklast. Hoe groter het aandeel nietplanbaar onderhoud (vooral spoed correctief onderhoud), des te onvoorspelbaarder de werklast en des te lastiger is het om een adequate personele bezetting te bepalen. Hierbij moet worden opgemerkt dat men toch moet pogen om het werklastpatroon, zoveel als mogelijk af te vlakken door het slim plannen van preventief onderhoud en activiteiten ten behoeve van modificatie. Het criterium bij het bepalen van het 'aantal medewerkers' per onderhoudsdienst is het minimaliseren van de kosten, om het onderhoud te kunnen plegen, en de kosten ten gevolge van gebrek aan onderhoudspersoneel. Teveel personeel heeft veel idle-time tot gevolg en leidt tot te hoge loonkosten. Te weinig onderhoudspersoneel leidt aan de andere kant tot veel stilstand waardoor kosten ontstaan o.a. ten gevolge van produktieverlies (stilstandskosten). Vooral de stilstandskosten, echter, zijn moeilijk te bepalen en zullen derhalve moeten worden geschat.

Bij Stork Brabant beschikt men b.v. in beide vestigingen (Boxmeer en Kerkrade) over vier produktiegroepen. Als er een storing optreedt op een machine in groep een is dat alleen erg, dat wil zeggen: zijn daar alleen stilstandskosten aan verbonden, als er daardoor produkten niet kunnen worden gemaakt, die wel kunnen worden verkocht. Omdat de machines in de verschillende produktiegroepen vrij universeel zijn, kan men bij een storing naar een machine, in dezelfde of een andere groep, uitwijken als daar nog capaciteit vrij is, en zijn er eventueel slechts stilstandskosten ter grootte van de extra omstelkosten. Als er geen capaciteit meer vrij is in andere groepen, wordt er een afweging gemaakt voor welke pro-

dukten men de machines het beste in kan zetten, zodat de stilstandskosten beperkt blijven. Tenslotte kan men ook nog kiezen om de produktie uit te besteden, of om de produktieplanning aan te passen en deelleveringen te maken.

– *Het bepalen van de grootte van de onderhoudsdienst*

Om het aantal medewerkers per onderhoudsdienst te bepalen kan men bijvoorbeeld uitgaan van historische gegevens of een analytische weg volgen, of een combinatie van beide.

Bij de analyse van historische gegevens wordt vaak uitgegaan van:

- een eventuele achterstand in het uitvoeren van onderhoudsactiviteiten
- de trend in het overwerk ten behoeve van onderhoudsactiviteiten en
- de frequentie van storingen en spoed-onderhoud, etcetera.

Een voorbeeld hiervan wordt beschreven in⁹. Ntuen, waar gebruik wordt gemaakt van een 'twee-parameter, lineair exponential smoothing model, om het aantal benodigde mensen te voorspellen.

Indien nodig, kan men na een zekere periode opnieuw middels dezelfde gegevens, maar dan voor de nieuwe bezetting, evalueren om zonedig opnieuw, al dan niet via een voorspellingsmethode, het aantal mensen te wijzigen.

Een geheel andere benadering is, in tegenstelling met bovenstaande adaptieve aanpak, het gebruik van kwantitatieve reken-technieken, waarbij men uitgaat van een beschrijving van het onderhoud als een wachtrijprobleem⁸. Reeds in de vijftiger jaren zijn hiervoor eerste voorzichtige pogingen ondernomen. Tot op heden echter heeft de grote complexiteit en de daarmee gepaard gaande complexe mathematische modellering van een onderhoudsafdeling een dergelijke benadering vrijwel onuitvoerbaar gemaakt. Slechts grote vereenvoudigingen laten een dergelijke benadering toe.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van simulatie. In deze benadering wordt een beschrijvend model gemaakt met bepaalde aannames over de verdelingen van de aankomsten van de onderhoudswerkzaamheden en de karakteristieken van de onderhoudsafdeling zelf. Doorgaans wordt een dergelijk model dan via een computer met diverse variaties van parameters (het aantal mensen dat ingezet kan worden als belangrijkste parameter) doorgerekend. Vervolgens wordt de 'goedkoopste' oplossing gekozen, dat wil zeggen: de kleinste bezetting die nog een acceptabele wachttijd voor onderhoud kan realiseren. De principiële moeilijkheid bij deze benadering ligt bij een juiste modelering van de diverse karakteristieken (de parameters en hun afhankelijkheden). Voorts kunnen deze modellen nogal rekenintensief zijn, waardoor krachtige computers kunnen nodig zijn.

Ofschoon er nog geen praktische voorbeelden van deze benadering bekend zijn, mag in ieder geval worden verwacht, dat men wel een gevoel krijgt van het belang van sommige invloedsfactoren.

In bovenstaande zijn we er stilzwijgend van uitgegaan dat we het onderhoud zelf uitvoeren. Het is echter ook mogelijk om (een deel van het) onderhoud – net zo goed als dat bij produktie kan – uit te besteden. Dit kan gunstig zijn voor wat betreft de kosten, maar er spelen ook andere overwegingen.

– *Uitbesteden van het onderhoud*

Een vraag, die men zich zou moeten stellen bij elke bedrijfsactiviteit, is of die niet beter door anderen uitgevoerd kan worden. Steeds vaker gaan bedrijven er toe over om allerlei activiteiten uit te besteden om zo de handen vrij te krijgen voor de kern-activiteiten. Aan evenwichtige 'make-or-buy' beslissingen ligt een beleid ten grondslag, waarin vastgelegd is welke activiteiten men belangrijk vindt voor de eigen toekomst en welke men daarvan zelf wil uitvoeren².

Het beleid bij Stork Brabant, ten aanzien van uitbesteden, is als volgt. Voor een aantal zeer complexe, dure technische systemen wordt zowel CO als PO uitbesteed. Verder wordt al het CO zelf uitgevoerd (tenzij er grote problemen ontstaan). Een redelijk groot deel van het PO wordt ook zelf uitgevoerd (vooral het klein preventief onderhoud). Hierbij kan nog worden vermeld dat van het onderhoud dat door de Technische Dienst wordt uitgevoerd (b.v. het onderhoud aan transportmiddelen), bijna al het preventieve onderhoud uitbesteed wordt (80%, waarvan wederom 80% aan de OEM's). De Technische Dienst heeft vooral de functie van 'troubleshooter'.

Vormen van uitbesteden van onderhoud

Voor het uitbesteden van onderhoud zijn er in principe twee mogelijke vormen. Of men haalt onderhoudscapaciteit naar het te onderhouden object, of het te onderhouden object wordt naar de 'leverancier', de aannemer van het onderhoud, gebracht. Dit laatste veroorzaakt dan een additioneel logistiek probleem. Overigens, het transport dat dan nodig is kan ook weer worden uitbesteed, aan de aannemer van het onderhoud of aan derden.

Practische en economische beperkingen

De volgende factoren spelen een belangrijke rol bij het uitbesteden:

- a. het type onderhoud
- b. de hoeveelheid werk
- c. de urgentie van uitvoering.

ad a. Bij specialistisch onderhoud, dat grote eisen stelt aan de vaardigheden van het onderhoudspersoneel, of als de bij het onderhoud te gebruiken apparatuur, de gereedschappen, kostbaar is, dan is het vaak voordeliger om dit onderhoud uit te besteden.

ad b. Met betrekking tot de hoeveelheid werk kan worden opgemerkt dat, hoe lager de bezettingsgraad (van het personeel en/of de benodigde gereedschappen)

binnen een bepaalde capaciteitsgroep, hoe aantrekkelijker de optie van uitbesteden wordt.

ad c. Over de urgentie van uitvoering kan worden gezegd dat die veelal optreedt als er ook grote pieken in de vraag naar onderhoud zijn. Bij kleine onderhouds-afdelingen kan een grote urgentie problematisch worden omdat er voor de verschillende disciplines slechts een gering aantal mensen beschikbaar is, waardoor de kwetsbaarheid (voor bijvoorbeeld ziekte) vooral voor de wat meer specialistische disciplines groot is. Dit is bij Stork Brabant het geval, waar men slechts beschikt over drie onderhoudsmedewerkers die ervaren zijn in elektronische problemen aan de technische systemen. Men moet daarom zorgen dat, als dat nodig is, er snel uitbesteed kan worden aan (een) tevoren daarvoor geselecteerde aannemer(s). Verder kan men overwegen om (een aantal van) de kwetsbare onderhoudsdiensten helemaal uit te besteden.

Daarnaast zijn er bij het uitbesteden natuurlijk ook praktische beperkingen. Er moeten bijvoorbeeld: aannemers voor het betreffende onderhoud beschikbaar zijn in de omgeving, ('importeren' van onderhoudscapaciteit). Daarnaast spelen de arbeidsovereenkomsten bij de betrokken bedrijven een rol.

Kostenafweging

Naast bovengenoemde factoren zullen de kosten een belangrijke rol spelen. Het gaat er om alle kosten te vergelijken die voor beide alternatieven, zelf onderhoud uitvoeren versus uitbesteden, verschillend zijn. Hieronder vallen onder meer: directe en indirecte loonkosten, kosten verbonden aan bezit van apparatuur ten behoeve van het uitvoeren van onderhoud (bijvoorbeeld gereedschappen), indirecte kosten (bijvoorbeeld administratie) en (de geschatte) stilstandskosten.

Soorten onderhoudscontracten

Men kan bij uitbesteden onderscheid maken tussen routine- en onregelmatige contracten⁶. Routine contracten worden afgesloten voor routineonderhoud op basis van een vast regelmatig programma. Onregelmatige contracten dienen voornamelijk om de pieken in de vraag naar onderhoud op te vangen door het uitbesteden aan een daarvoor tevoren geselecteerde aannemer. Men kan kiezen uit een 'job-unit' contract, wat afgesloten kan worden als daar de noodzaak toe is, of een 'open-call' contract, dat inhoudt dat gespecificeerd wordt wat er gedaan moet worden en wordt geïnitieerd, door het afroepen van de klant.

Selectie van aannemers van onderhoud

Bij de selectie van in aanmerking komende aannemers van onderhoudsactiviteiten kan men letten op: de ervaring van de aannemer op het betreffende gebied (referenties), de capaciteit en responsietijd – de tijd tussen het beroep doen op de aannemer en het gereedkomen van het te onderhouden object – van de aannemer, en de aansprakelijkheid in geval van wanprestatie.

Tot slot kan nog opgemerkt worden dat er waarschijnlijk geen 'beste manier van organiseren' is, maar in ieder geval moeten de verantwoordelijkheden voor die functies die samenhangen met uitbesteden eenduidig worden vastgelegd en toegewezen.

Literatuur

1. Bullock, James H. *Maintenance planning and control*, New York, National Association of Accountants, 1979.
2. Ford, D. and Farmer, D. *Make or buy: a key strategic issue*. Long range planning, Vol. 19, No. 5, (1986), pp.52-55
3. Geraerds, W.M.J. *Toestandsafhankelijk onderhoud*, dictaat TUE: Inleiding Onderhoudsbeheersing, pp. 59-74.
4. Gits, C.W. *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept; een kader*, dictaat TUE: Inleiding Onderhoudsbeheersing, pp. 75-103
5. Gits, C.W. *Het structureren van onderhoudssystemen*, dictaat TUE: Inleiding Onderhoudsbeheersing, handout.
6. Heintzelman, John E. *The complete handbook of maintenance management*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc., 1976.
7. Kelly, Anthony. *Maintenance management and control*, Butterworths, 1984.
8. Morse, P.M. *Queues, inventories and maintenance*, New York, John Wiley & Sons Inc., 1958.
9. Ntuen, Celestine A. *Forecasting maintenance crew size based on periodic maintenance records*. Production & Inventory Management, Vol. 30, No. 2, (1989), pp. 41-43.

De invloed van de machine- beschikbaarheid op de beheersing van de tijdigheid en produktievolume

5

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand

1. Inleiding

De beschikbaarheid van produktiemiddelen zoals machines, gereedschappen en mensen heeft voor verschillende bedrijfstypen, op geheel verschillende mate, invloed op de produktie en de produktiebeheersing. We moeten hierbij vooral onderscheid maken tussen de enkelstuks/kleinseriefabricage en de grootserie/massafabricage.

In de grootserie/massafabricage zien we dat de produktie zeer gevoelig is voor de beschikbaarheid. Het doet er hierbij niet toe of het de fabricage van enkelvoudige produkten betreft zoals verpakkingsglas, of metalen onderdelen, of complex samengestelde produkten zoals radio's of motoren. Essentieel is de vraag: hoe groot is het produktievolume van een bepaalde verzameling gelijksoortige produkten in relatie tot de taktijd van de geïnstalleerde capaciteit, en van de mate van integratie van de achtereenvolgende fabricagestappen. In deze notitie beperken we ons tot sterk geïntegreerde produktiesystemen voor hoge volumina van enkelvoudige of samengestelde produkten.

Bij een hoog produktievolume worden vaak gespecialiseerde produktiestraten ingericht, bestaande uit een verzameling complexe bewerkingsmachines die in een bepaalde, al of niet vaste, volgorde worden doorlopen. Soms zijn deze produktiemachines in de straat onderling gekoppeld door automatische transport- en buffersystemen. In dit soort situaties treffen we vaak zeer complexe produktieinstallaties aan wier storingsgevoeligheid relatief hoog is.

Dat is ook één van de redenen om tussen de opeenvolgende produktieinstallaties buffers aan te houden. De produktie van de lijn als geheel wordt hiermee minder gevoelig gemaakt voor storingen van de individuele machines.

Er bestaat momenteel veel theoretische kennis over de invloed van buffergroottes en het produktieniveau van een complexe produktielijn (zie bijvoorbeeld: Buza-

cott en Hanafin¹⁹⁷⁸, Wijngaard¹⁹⁷⁹). Deze invloed blijkt onder andere af te hangen van de storingskarakteristieken van de individuele machines.

De produktiebeheersing neemt deze storingskarakteristiek als uitgangspunt aan; het is een gegeven. De onderhoudsbeheersing bestudeert onder andere de vraag welke onderhoudsregels er voor een produktieinstallatie moeten worden gekozen.

Hierbij wordt in het algemeen gekeken naar het effect van de onderhoudsregels op de beschikbaarheid van de machine. Er wordt meestal niet gekeken naar het effect van de resulterende beschikbaarheidskarakteristiek van de machine, op de produktie van de lijn als geheel, met inachtnaam van de gehanteerde buffergroottes. Voor elke produktieinstallatie in een produktielijn wordt de beschikbaarheid beïnvloed door de onderhoudsregels (zie onder andere Geraerds¹⁹⁷², Gits¹⁹⁸⁴, Geurts¹⁹⁸⁶). Het is dus interessant om na te gaan welke de invloed is van de onderhoudsregels per machine op de produktie van een lijn, en van welke karakteristieken van de lijn zoals structuur, buffergroottes en dergelijke, dit afhangt. Het is aan de onderhoudsbeheersingstheorie om na te gaan of en tegen welke kosten de verschillende beschikbaarheidskarakteristieken kunnen worden gerealiseerd.

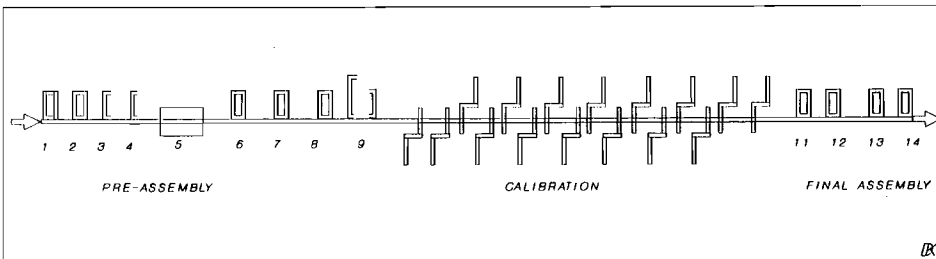
In dit artikel gaan we verkennend in op deze problematiek aan de hand van beschikbare kennis uit de produktiebeheersingstheorie. Het doel is na te gaan, welke kenmerken van de beschikbaarheid per machine in een lijn, effecten hebben op de produktie, hoe die kenmerken kunnen worden beïnvloed door de onderhoudsbeheersing, en hoe we kunnen komen tot geïntegreerde beheersingsregels. De opbouw van dit artikel is als volgt. In paragraaf 2 wordt een aan de literatuur ontleende voorbeeldsituatie geschetst van een samengestelde produktielijn met buffers. In paragraaf 3 worden de produktiebeheersingsregels voor deze situatie uitgelegd. In paragraaf 4 wordt getoond hoe het produktieniveau van de lijn samenhangt met de buffergroottes en beschikbaarheidskarakteristieken. In paragraaf 5 worden deze resultaten geïnterpreteerd in het kader van een geïntegreerd ontwerp van produktie- en onderhoudsbeheersing. Uit deze resultaten wordt voor dit voorbeeld getoond welke de winst kan zijn voor de lijn als geheel, van het veranderen van de beschikbaarheidskarakteristieken, en in welke mate er dus extra onderhoud mag worden gepleegd om deze verbetering van de beschikbaarheid te realiseren. In paragraaf 6 tenslotte besluiten wij met een aantal conclusies aangaande voordelen die te behalen zijn via het gezamenlijk ontwerpen van onderhouds- en produktiebeheersingsregels voor complex samengestelde produktielijnen in de grootserie/massafabricage.

2. Een hooggeautomatiseerde produktielijn

In deze paragraaf beschrijven we het ontwerp van een produktielijn voor muntvalidatiesystemen (zoals bijvoorbeeld gebruikt in koffieautomaten, frisdrankautomaten etcetera). Dit zijn systemen die nagaan of een ingeworpen munt aan een aantal criteria voldoet.

Het voorbeeld is ontleend aan het proefschrift van M.B.M. de Koster (1988, TU Eindhoven).

De produktielijn is ontworpen om meerdere types muntvalidatiesystemen te kunnen produceren. De lijn bestaat uit negen volledig geautomatiseerde montagestations voor de voormontage, vervolgens zijn er zestien halfgeautomatiseerde calibratiestations, en tenslotte zijn er vier volledig geautomatiseerde eindassemblagestations (zie figuur 1).



Figuur 1. Muntvalidatieproduktielijn

In de eindassemblage worden door elkaar heen en zonder omsteltijden de verschillende componenten op de subassembly gemonteerd.

De subassembly wordt aangevoerd uit de calibratiefase. De componenten zijn beschikbaar in bakken aan elk werkstation. Een produkttype-detector neemt waar, welk type subassembly wordt aangevoerd en op grond hiervan worden de juiste componenten geselecteerd uit de bakken. Een eindprodukt bestaat uit achtentien componenten. Er zijn in totaal achtentwintig verschillende componenten. Calibratie houdt onder andere in dat er een elektrische module, PROM genaamd, wordt gemonteerd. Deze is landspecifiek. De calibratie wordt gedeeltelijk met de hand gedaan. Eén operator kan meerdere calibratiestations bedienen. Calibratie is landspecifiek. Het omstellen van een werkstation naar een ander land kost ongeveer één uur. De calibratiecyclustijd is zes à acht minuten. Het omstellen naar een ander produkttype kost geen omsteltijd zolang het één produkt voor hetzelfde land betreft.

Alle stations zijn verbonden via een lopende band. De assemblagestations staan in serie geschakeld aan de band. Voor elk station is er een buffercapaciteit. De calibratiestations staan dwars op de lopende band, ze kunnen worden geslagen. De

calibratiestations kunnen dus worden beschouwd als parallelle werkstations. Voor elk station is er een buffercapaciteit. Een produkt wordt automatisch toegewezen aan het calibratiestation dat is ingesteld voor het betreffende land, en dat de laagste bufferinhoud heeft.

Indien zo een station er niet is, dan wordt het voorafgaande subassemblagestation automatisch stopgezet.

Alle assemblages worden uitgevoerd door robots en de cyclustijden zijn vast per station.

Tabel 1 toont de cyclustijden per station. De stations 1 t/m 9 zijn subassemblagestations, station 10 staat voor een willekeurige calibratiestation en de stations 11 t/m 14 zijn eindassemblagestations. De lopende band kan elke twee seconden een produkt aanvoeren in een buffer.

Tabel 1. Cyclustijden per station

MACHINE NUMMER:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
CYCLUS TIJD (SEC.)	20	18	12	12	8	12	20	20	9	360-480	8	13	7	19

De maximale output van de calibratiefase als geheel is tussen de 2,67 en 2 produkten per minuut, afhankelijk van het produkttype. We zien dat de calibratie de bottleneckfase is van de lijn. De lijn is in bedrijf: vijf dagen per week, drie ploegen van 7,5 uur per dag. Het omstellen van de calibratiestations naar een ander land vindt plaats buiten werktijd.

3. De productiebeheersing van de lijn

De lijn moet op jaarbasis ongeveer 550.000 produkten produceren. Rekening houdend met omsteltijden, uitval, reparatie en gepland onderhoud, levert dit een gewenste produktiesnelheid van 122 produkten per uur.

De maximale throughput is gedefinieerd als het aantal produkten dat per uur kan worden geproduceerd door het knelpuntstation, aannemend dat dit station volledig is bezet en er geen verstoringen optreden.

De productiebeheersing is erop gericht voor voldoende werkaanvoer naar de calibratiefase te zorgen, en operatorleegloop te vermijden. Een manier om dit te realiseren is het creëren van grote buffers tussen de stations, maar buffers zijn duur en de ruimte voor buffers is beperkt.

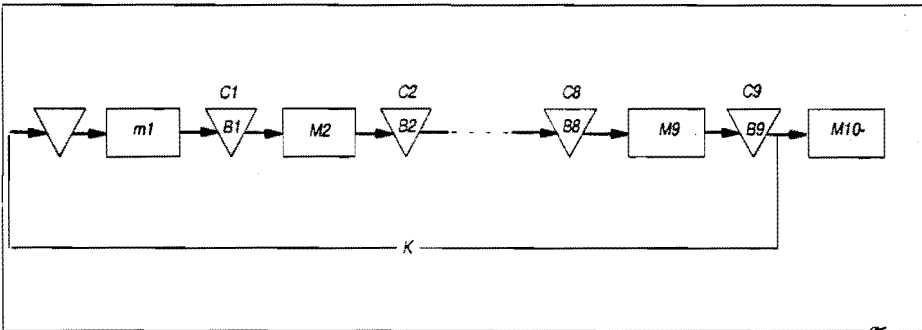
Gedurende een gehele ploeg is elk van de calibratiestations op een bepaald land

ingesteld. Het is dus zaak de aanvoer naar de calibratiefase zo te regelen dat er altijd genoeg aanvoer is van subassemblage voor de landen waarop de calibratiestations staan ingesteld. Hiervoor wordt een werklastbeheersingsregel gebruikt. Er is per land vastgesteld hoeveel subassemblies er voor dat land minstens in de lijn, op weg naar, of in de calibratiestations moeten zijn. De start van nieuwe produkten wordt zo geregeld dat altijd aan deze eis is voldaan.

4. De throughput van de lijn

De muntvalidatielijns is door De Koster gemodelleerd als een continue produktielijn. Hij beschouwt alleen de subassemblage en de calibratiefase, omdat de eindassemblage snel is en overcapaciteit heeft.

Figuur 2 geeft het model, met werkstations M_1 t/m M_{10} en met buffers B_1 t/m B_9 , met elk een capaciteit van zeven produkten, en met een totale werklast in het systeem van 21 tot 24 produkten, afhankelijk van de gemiddelde calibratietijd in het geproduceerde produktiepakket tijdens de ploeg.



Figuur 2. Model muntvalidatielijns

De produktiesnelheid van elke machine is constant. De stations zijn echter storingsgevoelig. Per station in de subassemblage is er een exponentiële life- and repair time distribution met parameters λ_i en M_i .

Er wordt verder aangenomen dat de calibratiefase kan worden gemodelleerd als een storingsvrij werkstation met een constante produktiesnelheid gedurende een gehele ploeg. Deze constante produktiesnelheid zal afhangen van de produktmix die gedurende de ploeg wordt gemaakt.

De uiterste waarde is 2 produkten per minuut en 2,67 produkten per minuut.

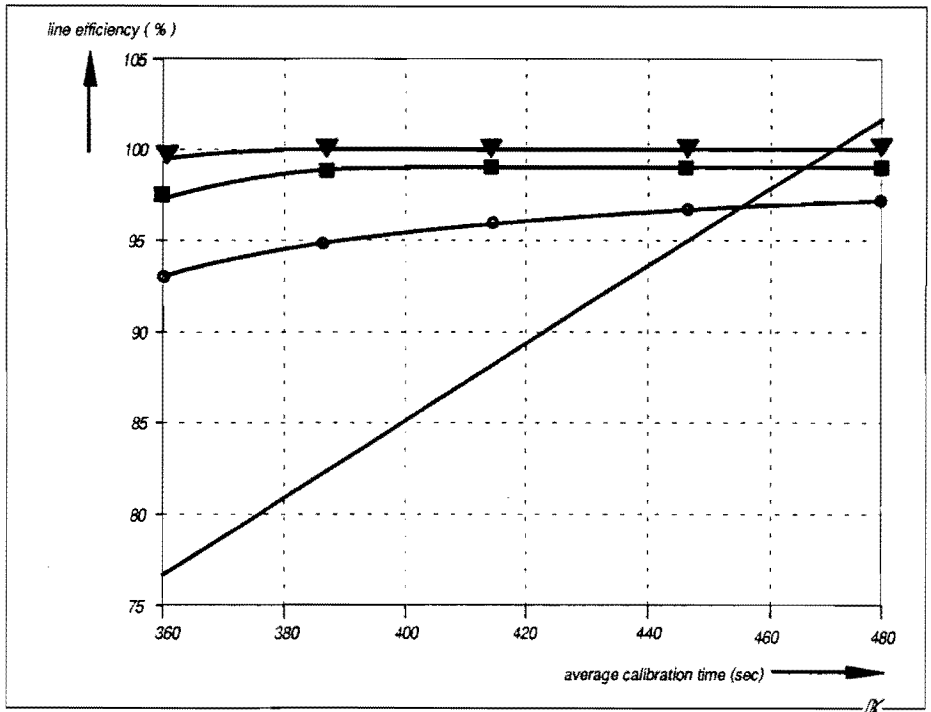
De vraag is nu: hoe groot moeten de buffers en de resterende werklast in de lijn zijn om de gewenste throughput door de lijn te bereiken, en hoe hangt dit af van de parameters van de life en repair distribution van de subassemblagestations.

De Koster leidt normen af voor de totale werklast in het systeem als functie van de gemiddelde calibratietijd gedurende de ploeg. Deze waarden zijn gegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Werklast norm K als functie van de gemiddelde calibratietijd

	Gemiddelde calibratietijd (sec)				
	360	390	420	450	460
K	21	22	23	23	24

In figuur 3 zien we de lijn efficiency weergegeven als functie van de gemiddelde calibratietijd, voor verschillende waarden van de faalkarakteristieken van de machines in de voorassemblage.



Figuur 3. Gemiddelde calibratietijd

In alle gevallen is de gemiddelde machinebeschikbaarheid gelijk aan 95%. De variatie in machinebeschikbaarheid kan echter sterk verschillen.

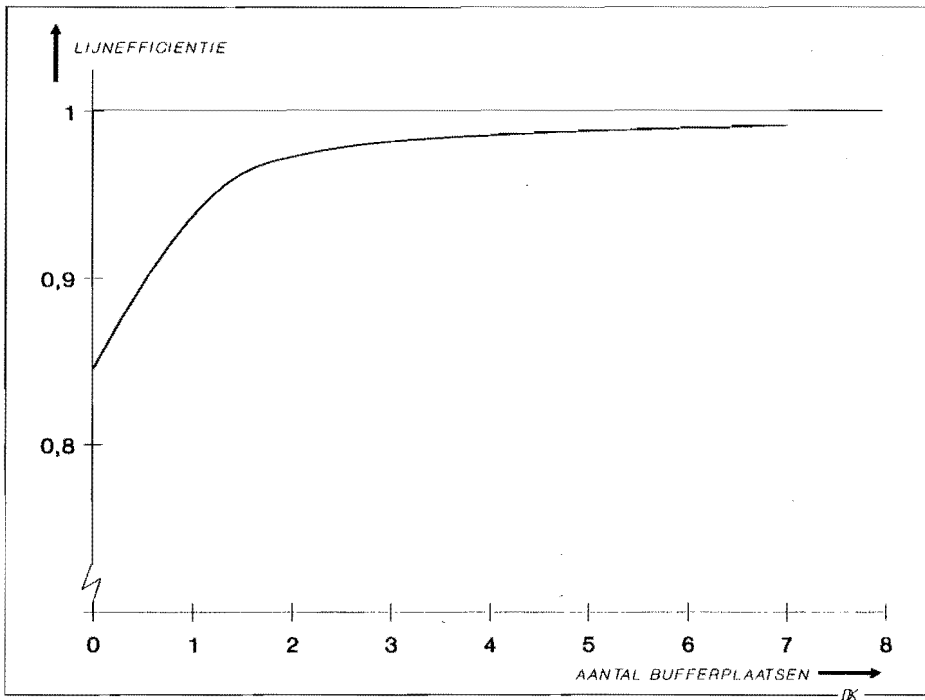
De bolletjeslijn staat voor de situatie waarbij de gemiddelde lifetime 3420 seconden is, en de gemiddelde repair time 180 seconden (af en toe een lange storing). De driehoekjeslijn staat voor het geval waarin de gemiddelde life time 855 seconden is en de gemiddelde repair time 45 seconden (hoog frequente relatief kleine

storingen). De blokjeslijn staat voor het geval waarin de gemiddelde life time gelijk is aan 2710 seconden en de gemiddelde repair time 90 seconden is.

We zien dat de lijn-efficiency erg gevoelig is voor de variatie in de machine-beschikbaarheid. Bij hoog variatie loopt de lijn efficiency van 92 tot 95%, terwijl bij een lage variatie de lijn efficiency ongeveer 99% is.

Het zal duidelijk zijn dat het mogelijk is de lijnefficiency bij de hoge machinebeschikbaarheidsvariatie te verhogen door de grootte van de buffer in de lijn op te voeren.

Figuur 4 laat een voorbeeld zien van de relatie tussen buffergrootte en lijnefficiency.



Figuur 4. De efficiency als functie van het aantal bufferplaatsen

Figuur 4 heeft betrekking op een systeem met twee machines met gelijke cyclustijden, van 1 minuut per produkt, gekoppeld door een buffer. De gemiddelde lifetime is 50 minuten en de gemiddelde repair time is 10 minuten.

We zien dat bij grote buffers de lijnefficiency naar 100% nadert. Voor een produktielijn met meer dan twee machines zal de lijn-efficiency bij eenzelfde buffergrootte natuurlijk lager zijn, maar ook hiervoor geldt dat bij toenemende buffergrootte de lijn-efficiency naar 100% nadert.

Het zal duidelijk zijn dat het creëren van grote buffers kosten met zich mee-

brengt, en de doorlooptijd van het productie-traject zal verhogen. Dat zijn beide ongewenste effecten.

Een andere mogelijkheid is om de aard van de beschikbaarheidskarakteristiek te beïnvloeden. Hierop gaan we in de volgende paragraaf nader in.

5. De relatie tussen productiebeheersing en onderhoudsbeheersing

Wat zijn nu de consequenties van deze relaties tussen beschikbaarheid, buffergrootte en lijn-efficiency voor het ontwerp van een productiesysteem zoals de muntvalidatielijn, de onderhoudbaarheid en het onderhoudsconcept van de lijn? Het is niet de bedoeling om hier in te gaan op onderhoudbaarheid en onderhoudsregels, maar enkel te laten zien hoe de grootheden, die door onderhoud kunnen worden beïnvloed, een rol kunnen spelen bij de inrichting van de produktielijn.

Wij nemen hiervoor aan dat onderhoud twee zaken kan beïnvloeden. Deze zijn:

- de gemiddelde beschikbaarheid van elke produktiemachine
- de variatie in de beschikbaarheid van elke produktiemachine.

Verder nemen we aan dat de beide beïnvloedingen beperkt zijn – het is niet mogelijk om 100% beschikbaarheid te realiseren – en verschillende kosten met zich meebrengen. Verder nemen wij aan dat de kosten van de produktielijn toenemen met de omvang van de buffers. Een bepaalde output kan dan worden bereikt met verschillende combinaties van gemiddelde beschikbaarheid, variatie in de beschikbaarheid en buffergrootte, en dus met andere combinaties van onderhoudsregels (te vertalen in onderhoudskosten) en buffergroottes (te vertalen in kosten van de produktielijn).

Zo zou het bijvoorbeeld kunnen zijn dat een dagelijkse inspectie plus preventieve onderhoudsinspectie (plus eventuele actie) van gemiddeld tien minuten, ertoe leidt dat bepaalde storingen worden vermeden. De gemiddelde stortingstijd van deze storingen bedraagt acht minuten per dag.

Op het eerste gezicht lijkt zo'n dagelijkse inspectie geen rendement op te leveren; immers het kost gemiddeld tien en levert maar acht minuten op. Echter wat gebeurt er als deze dagelijkse inspectie tevens de variantie in de beschikbaarheid terugdringt? We zagen in figuur 3 dat de variantie in de beschikbaarheid een grote invloed heeft op de lijn-efficiency. Bij gelijkblijvende buffergroottes bij verlaagde variantie zal de lijnefficiency kunnen toenemen, en dat kan opwegen tegen de twee minuten beschikbaarheidsverlies per machine per dag.

Als de gehanteerde buffers zo groot zijn dat reductie van de variantie in de beschikbaarheid nauwelijks invloed heeft op de lijnefficiency, dan kan de reductie in de beschikbaarheidsvariantie aanleiding geven tot verkleining van de buffers. Hierdoor kan een kostenverlaging ontstaan die opweegt tegen het nadeel van het gemiddelde machinebeschikbaarheidsverlies.

Laten we deze redenering eens toepassen op het voorbeeld van de muntvalidatielijn. Er wordt 2010 minuten per dag gewerkt. Bij 95% gemiddelde beschikbaarheid per machine levert dit een maximale throughput op van 1910 minuten per dag. Stel dat het introduceren van een periodieke preventieve onderhoudsbeurt leidt tot een gemiddeld beschikbaarheidsverlies van 19 minuten per dag per machine en tot een halvering van de variatie in de machinebeschikbaarheid. Er komen nu minder storingen voor, en de overblijvende storingen hebben gemiddeld een kortere interaankomsttijd en kortere reparatieduur.

Stel dat de storingskarakteristiek wijzigt van de bolletjeslijn in figuur 3 naar de blokjeslijn, en stel dat de buffergroottes ongewijzigd blijven. In dat geval levert de reductie in beschikbaarheidsvariatie een verhoging van de lijnefficiency op van ongeveer 4% (bij een gemiddelde calibratietijd van 420 seconden). De 20 minuten gemiddelde beschikbaarheidsverlies per machine levert een reductie van de *maximale output* op van 1%. De reductie in de variatie van de beschikbaarheid echter, levert een verhoging op van de lijnefficiency met 4%. Het netto resultaat is dus een output verhoging van 3%.

Dit is een positief eindresultaat dat alleen kan worden onderkend door de effecten van onderhoudsbeheersing en produktiebeheersing in onderlinge samenhang te bezien.

Besluit

In dit artikel hebben we aan de hand van een geautomatiseerde hoog-volume assemblagelijn een voorbeeld getoond van de interactie tussen onderhoudsbeheersing en produktiebeheersing. Wij zijn hierbij uitgegaan van de veronderstelling dat de beschikbaarheidskarakteristiek van de individuele produktiemachines in de lijn, qua gemiddelde en variatie, kan worden beïnvloed door de te hanteren onderhoudsregels.

We hebben aan de hand van de onderzoeksresultaten van De Koster⁶ (1988) laten zien dat met name de variatie in de beschikbaarheid per machine bij gelijkblijvende buffergroottes grote invloed kan hebben op de produktie van de lijn als geheel.

We hebben tevens laten zien dat dit effect op kan wegen tegen het directe machinebeschikbaarheidsverlies dat op kan treden door de toename van inspectie en preventief onderhoud.

We concluderen hieruit dat het voor complexe hoog-volume produktielijnen aanbeveling verdient het ontwerp van de lijn (buffergroottes) en de beheersingsregels en onderhoudsregels in onderlinge samenhang uit te voeren.

Literatuur

1. Buzacott, J.A. en L.E. Hanifin, Models of automatic transfer lines with inventory banks; a review and comparison. *AIIE Transactions*, 10, pp. 197-207, 1988.
2. Geraerds, W.M.J., 'Towards a theory of maintenance', p. 297-329 in: R. Bureau ed., *'The Organization of Logistic Support Systems'*. The English University Press Ltd., London, 1972, 593 pp.
3. Geurts, J.H.J., On the Selection of Elementary Maintenance Rules. Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 1986
4. Gits, C.W., On the Maintenance Concept for a Technical System. A Framework for Design. Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 1984.
5. Wijngaard, J., The Effect of interstage buffer storage on the output of two unreliable production units in series with different production rates. *AIIE Transactions*, 11, pp. 42-47, 1979.
6. De Koster, M.B.M., Capacity Oriented Analysis and Design of Production Systems. Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 1988.

Condition-based optimal replacement of a production system

6

*Prof. A.K.S. Jardine
Department of Industrial Engineering
University of Toronto*

The quality of decision-making in maintenance strongly influences the cost of a product of service and the maintenance activity should be viewed as an important element in an organization's operation.

The purpose of this presentation is to show how the information obtained through inspections (such as spectrometric analysis of engine oil or vibration monitoring) can be utilized to improve preventive replacement decision making.

A model of a production system which generates income while operating and is subject to random failure is considered. The failure rate depends both on the age of the system and on the values of a stochastic process reflecting the influence of the environment in which the system operates. Assuming that the concomitant information is available to a decision-maker at discrete points of time, we study the problem of finding a replacement rule which maximizes the long-run expected average net income per unit time.

Introduction

Many of the recently published papers deal with the problem of optimal replacement when there is information available about the condition of the system. Considerable attention has been paid to optimal replacement problems in shock models with additive damage in which failure can occur only at the times of shocks (e.g. Taylor(1975), Gottlieb(1982), Posner and Zuckerman (1986)). The form of the optimal replacement policy was found and conditions were determined under which a control limit policy is optimal. Models with continuous observation of the damage process in which the failure can occur at any time were studied e.g. by Bergman (1978) and Aven and Bergman (1986) (a more detailed survey can be found in Valdeze-Flores and Feldman(1989))

In engineering applications, usually the information about the underlying condition of the system is available only at discrete points of time through inspections.

The purpose of this presentation is to show how this information can be utilized to improve the preventive replacement decision making.

We consider a model of a production system which generates income while operating and is subject to random failure. The failure rate depends both on the age of the system and on the values of a stochastic process reflecting the influence of the environment in which the system operates. Cox's proportional hazards model is used to describe the failure rate of the system (see e.g. Cox (1972)).

The basic assumption in the PHM is that the failure rate is the product of a baseline failure rate dependent on the age of the system and a positive function Ψ dependent on the values of concomitant variables.

Let $Z = \{Z_t, t \geq 0\}$ be a right continuous diagnostic stochastic process that can influence the time to failure of the equipment. Thus, the failure rate at time t can be expressed as:

$$h(t, Z_t) = h_0(t) \Psi(Z_t) \text{ for } t \geq 0 \quad (1)$$

We assume that the values of Z are known only at discrete points of time Δi , $i = 0, 1, 2, \dots$ where $\Delta > 0$ is the length of time between successive inspection times. We approximate the stochastic process Z by the sequence $\{Z_n\}$ where $Z_n = Z_{\Delta n}$.

The system generates income while operating with the mean rate I dollars per unit time.

The system can be preventively replaced only at inspection times. Upon failure the system must be replaced by a new one and the replacement cycles are repeated indefinitely. Thus each preventive replacement costs C dollars, while each failure costs $K + C$ dollars, $K > 0$, $C > 0$. We assume that the downtime associated with a failure replacement is t_f time units and the downtime associated with a preventive replacement is t_p time units, $t_f \geq t_p \geq 0$. The problem is to find an optimal replacement policy which maximizes the expected average net income per unit time. Taylor (1975) and later Zuckerman (1977) studied a production system with the cost structure as in our model subject to random shocks occurring in a Poisson stream.

They showed that the optimal replacement policy is a control-limit policy with respect to the accumulated damage process.

In the following sections, we present the form of the optimal policy for our model (a more detailed derivation can be found in Makis and Jardine (1991)) and we shall concentrate on the computational aspects of the optimal policy and of the optimal expected average income per unit time. It will be shown that the optimal policy can be easily implemented and hence it is suitable for practical application.

1. The form of the optimal replacement policy

Assume that the values of concomitant variables Z_n are from the set $S = \{0, 1, 2, \dots, m\}$, $Z_0 = 0$ and let

$$kP(Z_{k+1}=j \mid T(k+1)\Delta, Z_1, \dots, Z_k) = P_{Z_{k,j}}(\Delta) \tag{2}$$

where T is the failure time of the system. It follows from Eq. (1) that

$$\begin{aligned} P(T < k\Delta + t \mid T < k\Delta, Z_1, \dots, Z_k) &= \exp(-\Psi(Z_k) \int_{k\Delta}^{k\Delta+t} h_0(s) ds) \\ &\cong R(k, Z_k, t) \end{aligned} \tag{3}$$

for $t \in (0, \Delta)$.

The replacement process can be viewed as a semi-Markov decision process (see e.g. Ross(1970) and the optimal replacement policy can be found by analyzing the average reward optimality equation.

It was shown in Makis and Jardine (1991) that if the baseline failure rate $h_0(t)$ is non-decreasing and the sequence Z_n is non-decreasing with probability one, then the optimal replacement policy is of the following form:

Replace in state (k, z) (the age of the system is $k\Delta$ and the present value of the diagnostic variable is z) if and only if

$$\xi(k, z, \Delta, g^*) \geq 0 \tag{4}$$

where $\xi(k, z, \Delta, g^*) = (1 - R(k, z, \Delta)) (g^*(t_f - t_p) + K)$

$$- (1 - g^*) \int_0^\Delta R(k, z, s) ds \tag{5}$$

and g^* is the optimal expected average income per unit time.

To find the optimal replacement policy, we need to compute the optimal expected average income g^* .

2. Computation of the optimal policy

It follows from (5), that the optimal replacement policy is a generalization of the classical age-replacement policy with a different optimal replacement time t_i^* for each damage level $i = 0, 1, \dots, m$, where

$$t_i^* = \Delta \cdot \inf \{n \geq 0: \xi(n, i, \Delta, g^*) \geq 0\} \quad (6)$$

$$\cong \Delta \cdot k_i^*, \text{ for } i = 0, 1, \dots, m.$$

It can be shown that $k^*_0 \geq k^*_1 \geq \dots \geq k^*_m$.

Obviously, the optimal replacement time is longer if the damage level is lower. Thus the computation of the optimal policy reduces to the computation of the optimal replacement levels defined in (6).

It follows from (5) that the optimal replacement policy can be found in the class of stopping times $\{T_d\}$, where

$$T_d = \Delta \cdot \inf \{n \geq 0: \xi(n, Z_n, \Delta, d) \geq 0\}, \quad (7)$$

the control function ξ is defined by Eq. (5). If we denote the expected average income associated with the replacement rule T_d by $\Phi(d)$, then by applying renewal theory, we obtain

$$\Phi(d) = \frac{I \cdot E(\min(T, T_d)) - K \cdot P(T_d \geq T) - C}{E(\min(T, T_d)) + t_p + (t_f - t_p)P(T_d \geq T)} \quad (8)$$

where T is the failure time of the system. It can be shown that the function $\Phi(d)$ is non-decreasing for $d < g^*$ and non-increasing for $d \geq g^*$ and the optimal expected average income g^* can be found by using the following algorithm:

For any $x_{D1} \geq 0$, define

$$x_n = \Phi(x_n - 1), \text{ for } n = 2, 3, \dots \quad (9)$$

The sequence $\{x_n, n \geq 2\}$ is non-decreasing and $\lim x_n = g^*$.

To compute $\Phi(d)$ for a given d , we need to compute $E(\min(t, T_d))$ and $P(T_d \geq T)$ where T is the time to failure and T_d is the stopping time given by Eq. (7).

For a given d , define for $j = 0, 1, 2, \dots$ and for $n \in \{0, 1, \dots, m\}$

$$L(k, n) = E(\min(T, T_d)(j, n)) - j\Delta \quad (10)$$

which is the expected residual time to replacement given that the present age of the system is $j\Delta$ and the present damage level is n . Obviously, $L(0,0) = E(\min(T, T_d))$ which we need to find.

Denote

$$k_n(d) = \inf \{j \geq 0: \xi(j, n, \Delta, d) \geq 0\} \quad (11)$$

for $n = 0, 1, \dots, m^*$

Then it can be shown (see Makis and Jardine (1991) that $\{L(j, n)\}$ satisfy the following system of equations:

$$\begin{aligned} L(j, n) &= 0 \text{ for } j \geq k_n, \\ L(j, n) &= \int_0^{\Delta} R(j, n, s) ds + \sum_{r=n}^m L(j+1, r) p_{n,r}(\Delta) R(j, n, \Delta) \end{aligned} \quad (12)$$

for $j < k_n$.

The backward recursion given by Eq. (12) can be used to find $L(0,0) = E(\min(T, T_d))$.

To find the probability $P(T_d \geq T)$, define for $n \in \{0, 1, \dots, m\}$

$$Q(j, n) = P(T_d \geq T \mid T < j\Delta, Z_j = n) \quad (13)$$

Then

$$Q(j, n) = 0 \text{ for } j \geq k_n$$

and for $j < k_n$

$$Q(j, n) = 1 - R(j, n, \Delta) + \sum_{r=n}^m Q(j+1, r) p_{n,r}(\Delta) R(j, n, \Delta) \quad (14)$$

It follows from (13) that $Q(0,0) = P(T_d \geq T)$.

To illustrate the algorithm and the computational procedure (10) - (14), we consider the following example.

Example: assume that

$$h(t, z) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \cdot \exp(\gamma \cdot z) \quad (15)$$

(the Weibull baseline hazard function) and let $\alpha = 10000$, $\beta = 3.3$, $\gamma = 0.5$, $\Delta = 1000$ (an inspection takes place every 1000 hr.), penalty for failure $K = \$5000$, the preventive replacement cost $C = \$1000$, the average income per unit time $I = \$4$, downtime associated with failure replacement $t_f = 100$ hr., downtime for preventive replacement $t_p = 20$ hr., $m = 2$ (the damage levels are 0, 1, and 2) and let the transition probability P for the Markov chain $\{Z_n\}$ be given by:

$$P = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,4 & 0,3 \\ 0 & 0,4 & 0,6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

We can start e.g. with value $x_1 = \{I \cdot \alpha \cdot \gamma (1 + 1/\beta) - K - C\} / \{\alpha \cdot \gamma (1 + 1/\beta) + t_f\}$ (the expected average income if we replace only at failure) in (9) and we get $k_0(x_1) = 7$, $k_1(x_1) = 6$, $k_2(x_1) = 4$ where $k_n(d)$ is defined by (11). Further results are in Table 1.

Table 1.

x_1	d	$L(0,0)$	$\alpha(0,0)$	d^1
3.	255814	4002.747000.	11770743.	576852
	$K(0) = 7$ $K(1) = 6$ $K(2) = 4$			
	3.576852	3149.6380000.	04704553.	580802
	$K(0) = 5$ $K(1) = 4$ $K(2) = 3$			
	3.580802	3149.6390000.	04704553.	580802
	$K(0) = 5$ $K(1) = 4$ $K(2) = 3$			

From Table 1, we have the optimal replacement times $t^*_0 = 5000$ hr., $t_i = 4000$ hr. and $t^*_2 = 3000$ hr.

The expected length of cycle is 3149.64 hr. and the probability of failure before preventive replacement is 0.047. The optimal expected average income per unit time is \$3.58.

Acknowledgements

I must acknowledge the collaboration and support provided to me by my colleague professor V. Makis in the preparation of this paper, the policy referenced in Makis and Jardine 1991 having being derived by Dr. makis.

Financial aid to undertake the work reported has been provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada under grant A4174.

References

1. Aven, T., and Bergman, B., (1986), 'Optimal Replacement Times. A General Set-up', J. Appl. Prob., 23, pp. 432-442.
2. Bergman, B., (1978), 'Optimal Replacement Under a General Failure Model', Adv. Appl. Prob., 10, pp. 431-451.
3. Cox, D.R., (1972), 'Regression Models and Life Tables', Journal of the Royal Stat. Soc. Ser. B 34, pp. 187-220.
4. Gottlieb, G. (1982), 'Optimal Replacement for Shock Models with General Failure Rate', Operations Research, Vol. 30, No. 1, pp. 82-92.
5. Makis, V., and Jardine, A.K.S. (1991), 'Optimal Replacement of a Production System – A Proportional Hazards Model', to appear in the Proceedings of the XIth ICRP, Hefei, China.
6. Posner, M.J.M. and Zuckerman, D. (1986), 'Semi – Markov Shock Models with Additive Damage', Adv. Appl. Prob., 18, pp. 772-790.
7. Ross, S.M. (1970), 'Applied Probability Models with Optimization Applications', Holden-Day.
8. Taylor, H.M. (1975), 'Optimal Replacement under Additive Damage and Other Failure Models', Naval Research Logist. Quart., 22, pp. 1-18.
9. Valdez-Flores, C. and Feldman, R.M. (1989), 'A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems', Naval Res. Log. 36, pp. 419-446.
10. Zuckerman, D. (1977), 'Replacement Models under Additive Damage', Naval Res. Log. Quart. 24, pp. 549-558.

Modelling for control of maintenance for production

7

*Prof. A.H. Christer
Centre of OR and Applied Statistics
University of Salford, UK*

Cost effective maintenance for production is possible if the consequences upon production of maintenance activity are both recognised and known quantitatively. To understand such a complex interaction requires a maintenance modelling exercise.

The notion of actually modelling maintenance is novel. This paper outlines the role and benefits of quantitative modelling of the cost and production consequences of modifying a maintenance concept. The point is made that routinely collected data is inadequate to the maintenance modelling task, and that additional information will usually need to be obtained from experienced maintenance and production engineers in order to construct maintenance models. The main ideas are presented in the framework of a case history.

Introduction

Within manufacturing it has always been true that the maintenance function exists to serve the purposes of production and profit. What has not always been true is that this has actually happened. Numerous obstacles can exist to prevent cost effective maintenance, some of which are the self-inflicted wounds of an inappropriate management structure, and some of which are of an intellectual nature associated with lack of adequate analytic support for production and maintenance decision-making. Stress, conflict and inefficiency must be expected if production and maintenance are not managed as an integrated activity. To knowingly and demonstratively achieve cost effective maintenance requires some form of maintenance modelling process. As yet the notion of actually modelling maintenance practice, as opposed to modelling failure data, is still in its infancy. But the situation is changing.

Here the term maintenance modelling is used in a specific sense. There are a number of modelling techniques used to advantage within the maintenance environ-

ment. These include for example inventory control, network planning, queuing models of service, scheduling, manpower planning, logistics, Markov models etc..... These are all model types which are generally applicable to numerous areas of activity, one of which could be maintenance.

By 'maintenance model', we mean a model specifically built for the maintenance function and which, unlike the other models used in the management of maintenance, actually addresses decision-makers relating to the engineering issues and consequences as opposed to operational and organisational choices.

Today the importance of maintenance to production is accepted, as it always has been, but what is new is that the importance is now being understood. There are various pragmatic reasons for this development associated with both technological advances in manufacturing plant and with changes in production policy. As production plant becomes more automated, high volume, and expensive, the cost and consequences of downtime are both correspondingly high and visible. The control and reduction of the downtime due to plant unavailability is usually viewed as a maintenance problem, and some means of maintenance for an appropriate output from the plant is demanded – but not at any price. Multiproduct and flexible manufacturing schemes are designed to increase the total value of output from a manufacturing plant, but to do so requires the generation of complex integrated production schedules. If an item of plant is unavailable for use, the less efficient revised schedule could cause the loss of much of the potential gain from a production batch. Again, the perceived consequences of maintenance upon production will likely become visible, high profile and costed, thereby forcing an understanding of the importance of maintenance. To establish efficient and cost effective maintenance, it is necessary to know the relationship between cause and effect of maintenance operations, that is, to model the maintenance practice. Whilst there is a history of using models for maintenance management, the notion of modelling maintenance itself is novel. This is a nontrivial task and research work has been and is being undertaken in this area. It is arguably in the interest of Industry that this research be further stimulated whenever possible. There are other changes taking place in industry as a consequence of developments in production technology. As observed recently by Fisher¹ when reviewing opportunities for OR modelling in manufacturing, one of the consequences of advances in manufacturing technology and automatic is the change in emphasis from monitoring the quality of a product to monitoring the quality and condition of the plant manufacturing the product. This leads us into the area of condition monitoring of plant, which in concept is closely allied to the health screening of patients.

In both cases the entity of interest is maturing with time, defects can arise at random times which may or may not be capable of some degree of correction, the existence of abnormalities may be detectable after some stage of development by a test of condition, and the test may or may not produce appropriate signals. The

decision-maker has to decide what monitoring tests to apply and what to do with the results. Indeed, whilst the medical screening area abounds with modelling work, Lee et al.², the closely allied field of equipment monitoring is relatively thin on quality research.

The author is unaware of any serious attention that has been given to modelling the progression of defects after condition monitoring, and without this, there is no way of knowing if monitoring practice is truly cost effective.

For example, the Canadian Pacific Railway undertake gearbox oil analysis of each of its locomotives twice a week, and based upon the recorded analysis will withdraw locomotives and overhaul the gearbox, Aghjayan³. Since this policy started, there has been a dramatic reduction in the number of gearboxes failing in use, which is a measure of the success of the condition monitoring policy. Unfortunately, on some half of the occasions a gearbox is overhauled, no fault or evident reason to require the overhaul is found. I suggest there is clearly a need here to model the condition based maintenance practice to determine an efficient cost effective maintenance.

1. Maintenance models

In the introduction, the importance of maintenance modelling to production we highlighted. This section will expand on this theme and develop in more specific terms the notion of maintenance modelling. The process of data modelling, such as producing Weibull plots, is well understood by engineers.

What is less understood is what might be called maintenance modelling. To give an example, consider a high speed canning line and suppose it is maintained by a series of regular inspection checks followed up by immediate repair of any defects found. Failures arising between inspections are repaired as they arise. Accepting for the moment the maintenance concept for the plant is appropriate, Gits⁴, it remains to select the inspection period to achieve the production objectives in a cost effective fashion.

If, for example, the objective was simply to reduce downtime, a maintenance model might take the form of figure 1 for $D(T)$, the downtime per day to be expected when inspecting the plant every T days.

With such a consequence measure available, production/maintenance managers could readily identify the range of inspection periods that were best, and pick a particular period knowing the expected production consequences to the plant. An additional and valued product of modelling here is an understanding by production of the imposition placed upon them to release plant for maintenance at appropriate times and the reason for it.

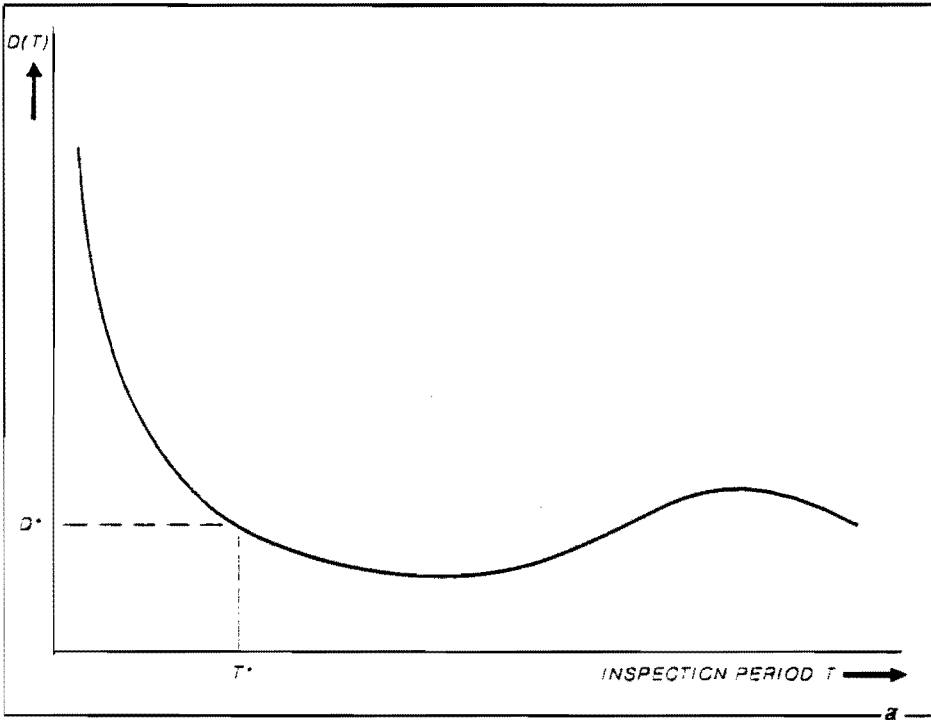


Figure 1. Downtime per day $D(T)$

Had the production output been net profit per unit time, then in the case of a continuous production process, different inspection periods are associated with both different inspection costs and different levels of downtime, or of production time. Suppose, for example, the plant operates 24 hours a day, 7 days a week, and that a full hours production is valued at c_1 . Inspection on period T days, the output per day has value $24D(T)c_1$. Suppose also that the average inspection check costs c_2 , so that the inspection cost is c_2/T per day. Finally, depending upon the inspection period there will be a number of breakdowns arising over T days and requiring repair at $c_3(T)$ say. We have, therefore, a measure of profit per day $P(T)$ given by

$$P(T) = [24 - D(T)]c_1 - \frac{c_2}{T} - c_3(T)$$

which has the graphical form of figure 2.

Too much inspection activity (maintenance) will cause production to make a loss, and too little will reduce the profitability of the plant. Figures (1) and (2) are maintenance models and represent models of the downtime and net profit consequences of the chosen maintenance action, inspection, against various periods of application. With such models, cost effective maintenance for production

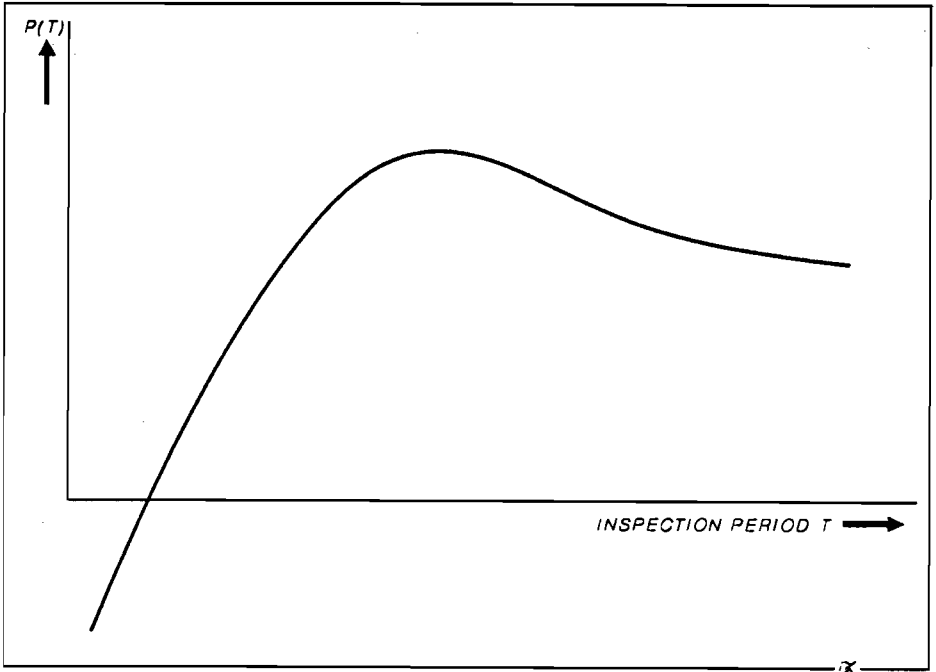


Figure 2. Profit per unit time $P(T)$

and for profit is both a tangible concept and relatively simple to achieve. So what is the problem ?

2. Data for maintenance modelling

In reality, a well organised production facility could be expected to know at most one point only of a maintenance model such as figure 1 say, and that would be the point representing the average downtime per day corresponding to the current practice of conducting maintenance inspections on period T^* , see figure 3.

If the objective is to reduce downtime, little if any assistance is available to advise upon increasing or decreasing the inspection period T^* and even less advice is available on the likely quantitative consequences. The same problem exists if the objective is to improve net profitability, quality, volume or output, or indeed any other measure of production. We need to ask why this is and what can be done about it. The point to be developed below is that the computer based data typically available is, in itself, generally inadequate to model maintenance situations. Indeed, in many ways the key information problem confronting the maintenance engineer of 20 years ago has not changed – what is required appears for many to be still out of reach.

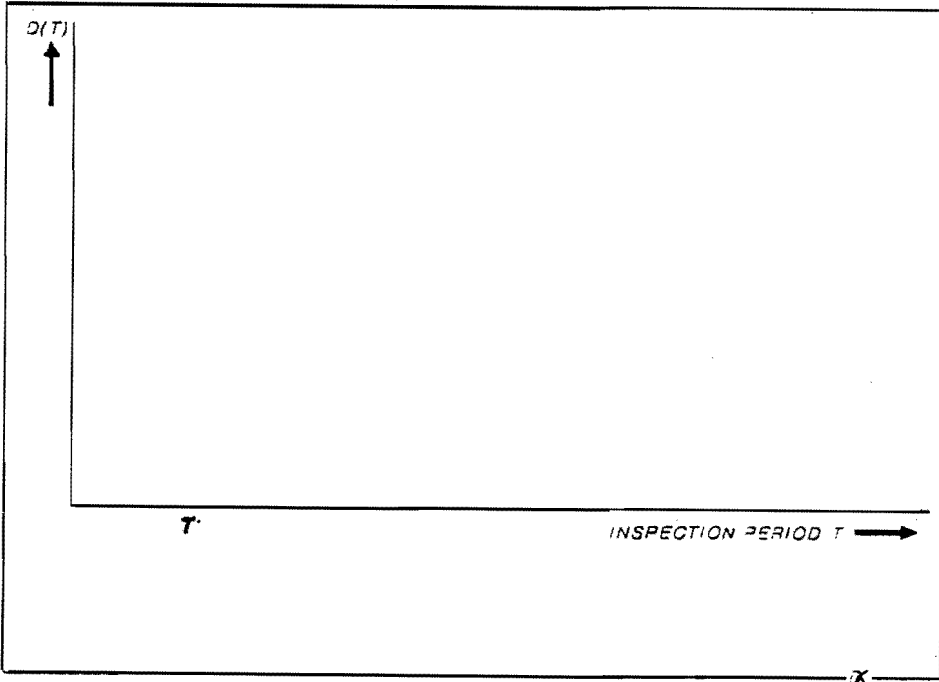


Figure 3. Known point of model

Fifteen to twenty years ago, a statement voiced in a variety of ways by maintenance engineers was that 'if only we had the data, our problems would be solved'. The Information Technology revolution has proved otherwise; the problems have not been solved, they have been changed. Whereas twenty years ago, after much manual effort, the one status quo point on figure(3) could be determined, today the same point can be determined with much less effort. But little more is available. Masses of data is on tap. But as always, useful and useable information is much harder won.

Let us consider for the moment data that is typically available and what can, and what cannot, be achieved with it. As far as failures are concerned, with certain variations one can expect the data and time of failure, the machine or component identification number, the repair or replacement undertaken, the number of man hours of labour required, the spares used, and the time the plant items was returned to production. Likewise, in the case of routine maintenance intervention, the data and time of activity, the plant item concerned, work done spares used, and the time returned to production would normally be recorded.

Such data is very useful for producing trend statistics over time relating perhaps to downtime, overtime, output, operating costs, ..., see figure 4 for a typical downtime plot.

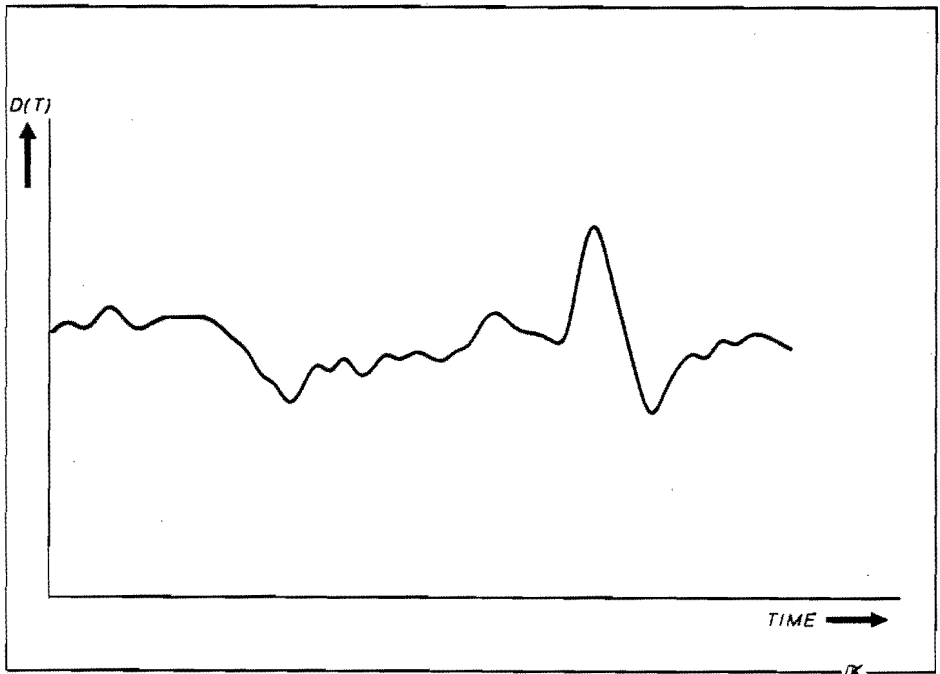


Figure 4. Downtime per day

Such monitoring plots are very useful for alerting management to trends, especially increasing trends, and in highlighting anomalies requiring investigations. In this figure, events are operating steadily at the downtime level of D^* . What such data cannot do is to inform us whether or not in any sense the level D^* is correct. If the model of figure 1 applies, an increase in inspection period would lead to a reduction in the downtime per unit time experience, that is the curve of figure 4 would be much as it is, but lower by the mean improvement in downtime level. Figure (4) itself could not tell us this, not could the typical supporting data that is collected.

Clearly, a computer maintenance database can readily develop numerous maintenance and production performance indices that may be of interest. What it cannot do is relate indices to cost effective maintenance. This can only be done if the consequences to production of undertaking maintenance to achieve specified performance index levels is known. This implies that if the maintenance has been modelled as a function of performance indices. I am unaware of any case where this has been done or even attempted. Any suggestion of using maintenance indices as a criterion measure is arbitrary and most ill advised.

The value of indices lies in monitoring trends and signalling changing circumstances, very much as the more direct trend curve of figure (4).

Putting aside for the present consideration of data quality, one immediate return from computer based data is the possibility of a histogram, and therefore distribution, of time to failure of various items of equipment or components. This can be very useful if a policy of age-based replacement is being contemplated, since the recommended replacement age can be calculated in a standard fashion Jardine⁵.

However, it is important to recognise that the failure characteristics are a property of, amongst other things, the maintenance policy operated. For this reason the failure data will generally be a function of the maintenance practice and be unable to assist in identifying a failure time distribution or therefore the best age based replacement policy, if the maintenance policy itself was to change.

To sum up this section, the usual database enables at best the single point corresponding to current practice to be known for a maintenance model, figure 4, but does not actually permit the model to be constructed. For this to be done, some means is required of estimating the consequences of varying T . There is a method for doing this currently being developed, refined and tested call delay time analysis and this will be outlined below.

3. Delay time analysis

First, and to keep ideas clear, let us return to the high speed canning line and let us suppose the overall objective of maintenance is to reduce plant downtime. Suppose the canning line is to be maintained by inspection maintenance on a regular period T , and that our task is to establish the appropriate model corresponding to figure (1), and to select the best T . At every inspection, defects in the line may be identified and repaired as part of the inspection. When a failure arises, it is repaired immediately.

There are two aspects to modelling maintenance, the first being to seek to reduce the number of faults arising and their consequence, and the second to model the subsequent maintenance concept as an aid to decision-making.

To reduce the number of defects arising, it is necessary to identify the cause of defects and possible means of removing or reducing the cause. This is a key part in forming a maintenance concept, Gits⁴, is allied to reliability and reliability growth, and is directly associated with snap-shot modelling, Christer and Whitelaw⁶.

A snap-shot model is the product of a comprehensive information collection survey which operates for a limited period of time on the plant of interest. A questionnaire is completed at every maintenance intervention which requires both objective and subjective responses, and the totality of the information provides a picture of the plant as of that point in time.

The limited period snap-shot survey would normally operate additional to the used data collection practice.

There is a wealth of information available for the asking at any maintenance intervention. For example, at a breakdown the range of information that could be collected is indicated in figure 5. A different survey from would be used for a PM type check and for a breakdown. The set of questions and issues of figures (5) would be asked of every breakdown in the plant arising over the survey period. In the case of cause of the breakdown, in addition to knowing what broke down, a picture is established of what is causing various types of problems.

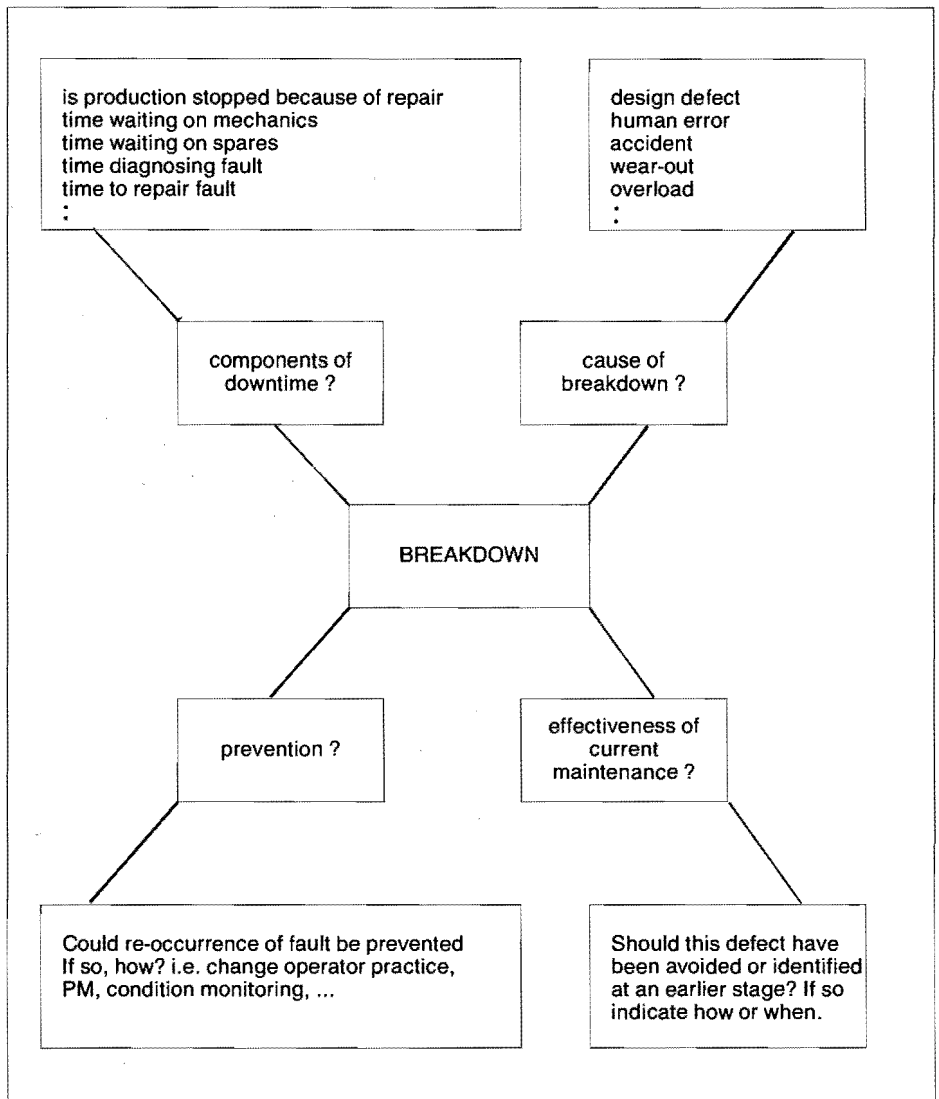


Figure 5. Issues for investigation at a breakdown

Knowing this, engineers can contemplate means of removing or reducing the cause of defects. Another part of the snap-shot modelling process is to reduce the consequences of defects given they still arise. If the consequence was measured by down-time, a study of the component parts of downtime would hopefully highlight necessary steps to reduce downtime by more efficient repair operations once defects arise. For example, the effect of more or less fitters or the waiting time for a repair crew may be assessed, as could the extent to which the correct spares are being stocked or whether or not management should consider investing in further diagnostic aids or training. The main point is that one attempts to identify and quantify the component parts of downtime for what they are and then address any recognised problems accordingly.

Questions on prevention are the maintenance operative's opinion, and serve in aggregate as a guide to engineering management. Finally, there are questions designed to check the extent to which the current maintenance practice is being usefully and productively implemented. This is only a sample of what could be investigated via such a process. Survey questions are customer designed for the plant in questions and envisaged problems to be investigated.

The process of snap-shot modelling can assist in recognising and quantifying the true problem for what it is and, properly read, suggest possible means of solution. Much of the information is subjective – being the personal opinion of the person completing the questionnaire. Providing snap-shot data is a non-trivial activity and to ensure the appropriate degree of effort and thought is given to providing the data, the survey period must be kept as short as possible consistent with an adequate sample. It is quite unrealistic to expect such subjective data could be collected on a regular basis and retain quality, since the volume of data would usually not be used. Snap-shot modelling or its equivalent is in the main a necessary prerequisite to modelling which augments to routinely operated maintenance data system.

It is interesting to note that only a small portion of the total survey data will usually be used directly and explicitly in modelling, but before it has been collected – the particular portion is unknown. As for deciding who should provide the survey data, a working rule is to go to the lowest level of maintenance – production operative associated with the plant whose opinion would be respected by management.

4. Example Snap-shot modelling

As an example of snap-shot modelling, consider the high-speed canning line of reference⁷. This line operates 24 hours a day 7 days a week, with one approxima-

tely $\frac{1}{2}$ hour maintenance inspection stop every 24 hours. A simplified view of the plant is given in figure 6.

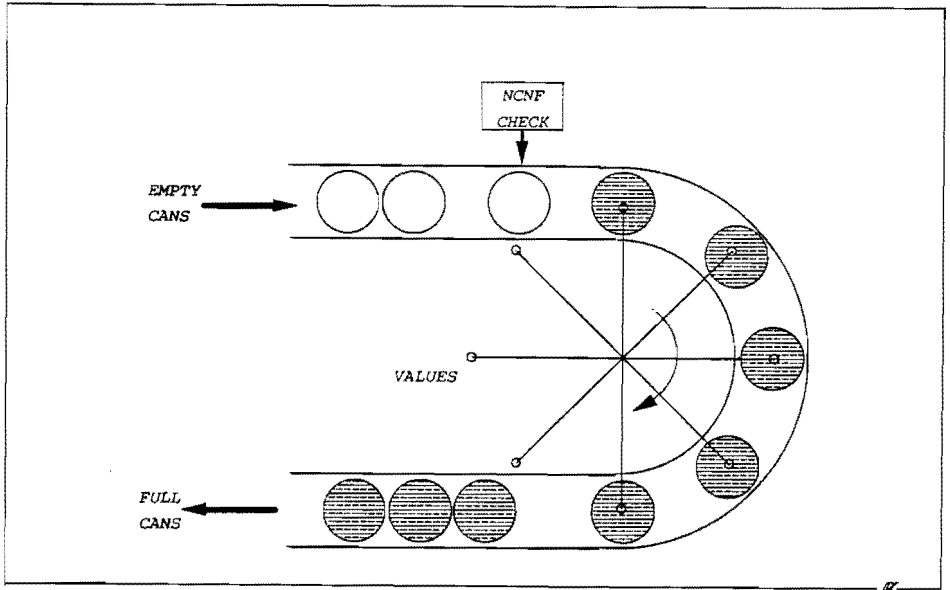


Figure 6. High Speed Canning Line

As empty cans flow towards the filling machines, one of forty filling valve intercepts the can as it moves round a semi circle and injects the product to the can. There are numerous other devices such as acceleration and deceleration mechanisms and an electronic no can no feed check, seams to secure can lids, coders, ... For now it is sufficient to understand that the plant concerned was readily subdivided into a set of component parts which were recognised as separate items with their own failure characteristic and problems.

Survey forms were designed for both breakdown and inspection interventions and a saturation survey undertaken for a 6 week period. One of the many representations of the volume of snapshot data is given in figure (7) relating the total number of defects (72) to the fault area, and perceived means of prevention. It is readily seen that the chief problem is with the valves, with the seam lever following some way behind.

Since the data exists, it is just as simple to present, for example, the total downtime against fault area and means of prevention or cause of fault. In the study concerned, it had been known for some time, that valves were a problem, but the size of the problem had never been quantified by management. Their response was to disbelieve the aggregated opinions of the fitters, who appeared to think

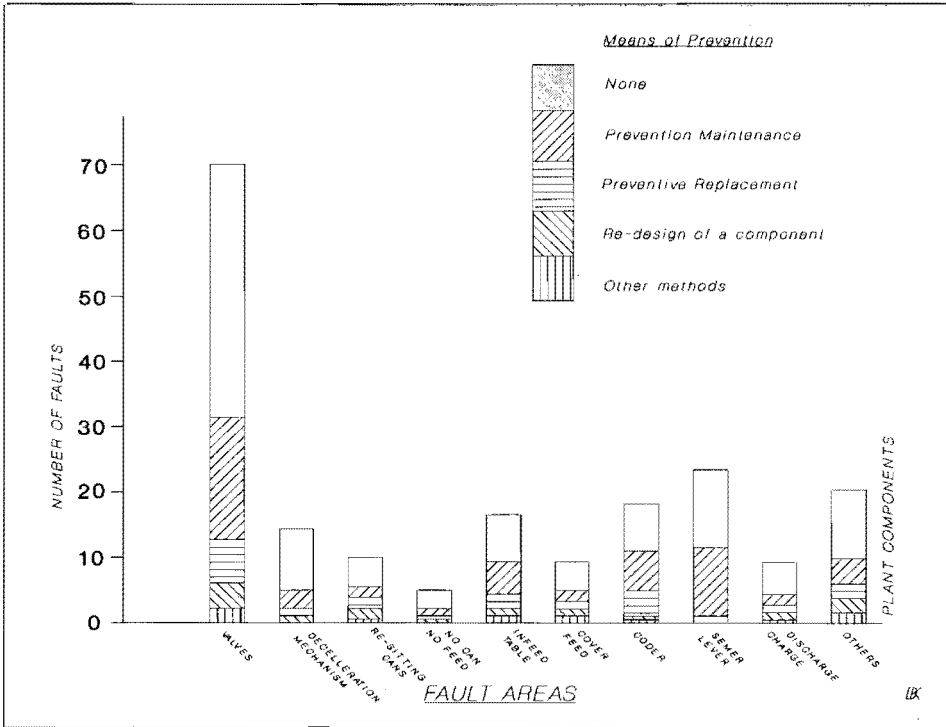


Figure 7. Snap-shot model of Canning line Faults by fault area and means of prevention

relatively little could be done to reduce the number of valve faults, but to commission a small group of engineers to study the valve and attempt to design out the problem.

To a lesser extent, some design attention was also given to the seamer lever. Of the other components, there was no specific problem considered to be worthy of special attention.

It has been found that engineering management are able to readily interpret and assess these models and use them effectively. One of the chief strengths of the process is its attempt to actually quantify effects. This has been seen to produce an immediate change in attitude and practice of production maintenance management.

Having undertaken a snap-shot modelling process to identify problems for what they are, to reduce the number of defects, and to reduce or control the consequences of defects, it remains to model the resulting maintenance practice. This requires delay-time analysis.

5. Delay time analysis

Assuming appropriate action has been taken to reduce the number and consequence of defects arising we still have the task of modelling what is left. For the example being discussed, this means obtaining a model of canning line downtime against all the various options of inspection period T .

To do this, we need first to introduce the concept of delay time.

Suppose a failure occurred in a plant at time t , say. It may well be the case the defect giving rise to the failure did not also occur at time t , but existed for some period before t and could have been identified at an inspection before time t . Let u be the first time a particular breakdown could first have been reasonably expected to be identified by inspection.

Then the time between u and t is called the delay time h of the fault, see figure 8.

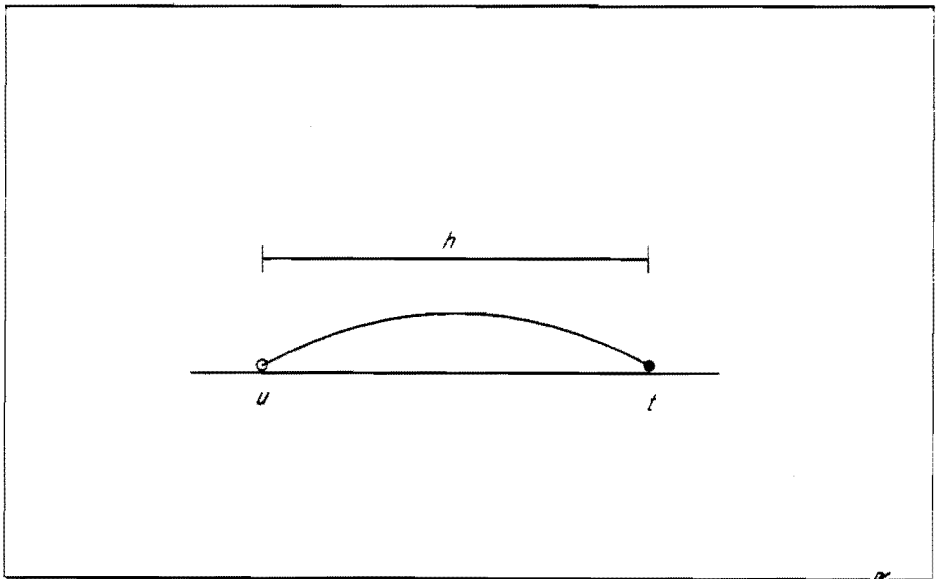


Figure 8. Delay time

Had there been an inspection at any time between u and t , the defects could have been detected and repaired without a breakdown occurring.

Here, a breakdown is when in the view of management the repair of a defect is essential and cannot be delayed any longer.

For plant such as the canning line, there will be numerous and different delay times according to the fault arising. Delay time cannot usually be measured in the absolute sense, but they can be estimated as part of the snapshot questionnaire

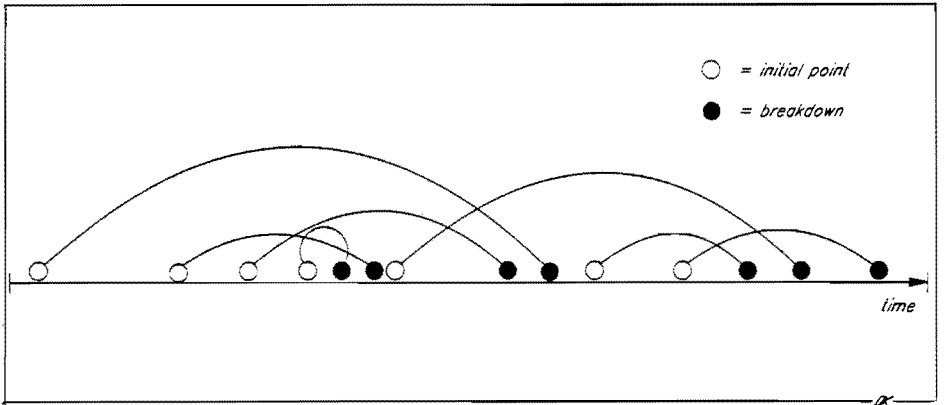
process At the time of undertaking repairs, the operator could be asked to estimate for each breakdown repair 'how long ago could the defect first reasonably have been expected to have been identified by an inspection'.

This provides an estimate of the delay time for a breakdown, and a slightly modified question would lead to an estimate of delay time for an inspection repair⁷. The question being asked here is, of course, being asked in a very specific situation and well defined context with the fault concerned actually present. The answer is, nevertheless, the subjective opinion of the operator for that particular defect. By obtaining a set of such delay measures $\{h\}$ which characterise the plant, it is possible to establish the histogram of the delay time random variables estimate, and thereby obtain an estimate of the probability density function of delay time $f(h)$. This will enable models of alternative inspection period, T , to be constructed, Christer & Waller⁷.

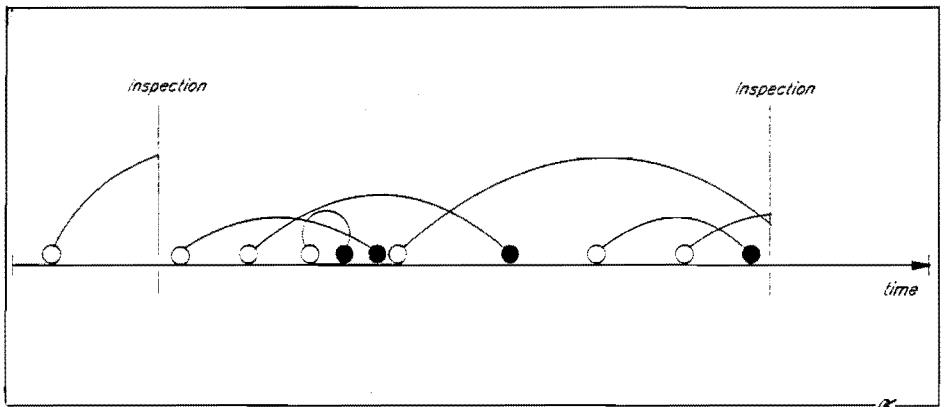
To show this is possible, consider the following notional time history of the canning line, with faults arising at points "○" and leading after a delay time h to breakdowns at points "●", see figure 9.

Assuming a defect present at an inspection will be identified at the inspection, it is evident from figure 9 both that the period of inspection influences the operating outcome, and that the delay time measure h actually determines the outcome. Indeed, the delay time is a fundamental ingredient to the inspection process since without its existence in fact, there would be no point in inspecting. As the frequency of inspection increases, figure 9(a)-9(c), the number of breakdowns decreases, but the number of inspection repair increases. Note that the total number of defects stays the same since the inspection process is not preventive, that is it does not prevent defects arising. What it does do is prevent breakdowns arising and to hopefully enable earlier and maybe less costly repairs to be undertaken in a more convenient and planned fashion.

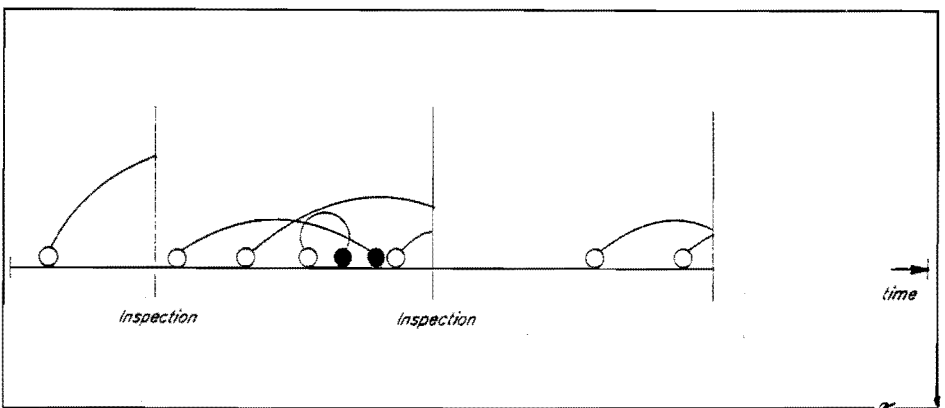
However, figure 9 demonstrates in principle how delay time measures determine $b(T)$, the probability of a defect arising as a breakdown for a particular inspection frequency T . In reality this function, $b(T)$, would most likely be obtained by mathematical modelling, Christer & Waller⁷, or perhaps by simulation.



9a. No inspections, seven breakdowns



9b. 2 inspections, 3 inspection repairs, 4 breakdowns



9c. 3 inspections, 5 inspection repairs, 2 breakdowns

Figure 9. Dependency of inspection outcome on delay time and inspection frequency

6. Example of delay-time analysis

Returning to the high speed canning line, the objective in selecting the inspection period T , is to reduce the totale line downtime. Current practice was to overhaul every 24 hours, though occasionally inspection did not take place. Downtime is caused by both breakdowns and inspections. Whenever an inspection took place, additional labour would be available to enable all the defects identified to usually be rectified within the inspection.

The first stage of delay time modelling is to establish the delay time distribution for the plant. In the case of the canning line, the actual subjective distribution derived from the snap-shot survey is shown in figure 10.

This picture itself can give a strong indication as to the potential of an inspection system. If, for example, the majority of the defect had such small delay time that a very small proportion would have delay time of the order (or longer than) any perceived likely inspection period, then unless the potential consequences of the relatively few defects the inspection process might identify was sufficiently serious, an inspection system of repair would not appear appropriate. However, this clearly is not the situation for the canning line in question.

A model for the downtime per week, $D(T)$, arising from the canning line is given below

$$\begin{aligned} D(T) &= \text{Downtime from inspection} + \text{Downtime from breakdown} \\ &= (\text{Average number of inspections per week}) (\text{Average inspection time}) \\ &\quad + (\text{Average number faults per line per week}) \\ &\quad \times (\text{Proportion of breakdowns}) (\text{Average downtime per breakdown}) \\ &= \frac{(5 \cdot 20 \times 24)}{T} \times (0 \cdot 525) + (16 \cdot 60) \cdot b(T) (0 \cdot 698) \end{aligned}$$

i.e.

$$D(T) = (65 \cdot 5)/T + 11 \cdot 59 b(T),$$

where t is measured in hours and $b(T)$ is calculated from the histogram data for $f(h)$. This expression for $D(T)$ is the mathematical model for the estimate of the consequence to totale downtime of inspecting on a frequency other than the notional 24 hours of current practice. It is the mathematical form of the conceptual model of figure (1), and a graphical presentation of this form is given in figure 11. The only difference is that in the study of the canning line, it proved more convenient to consider downtime per week and not downtime per hour.

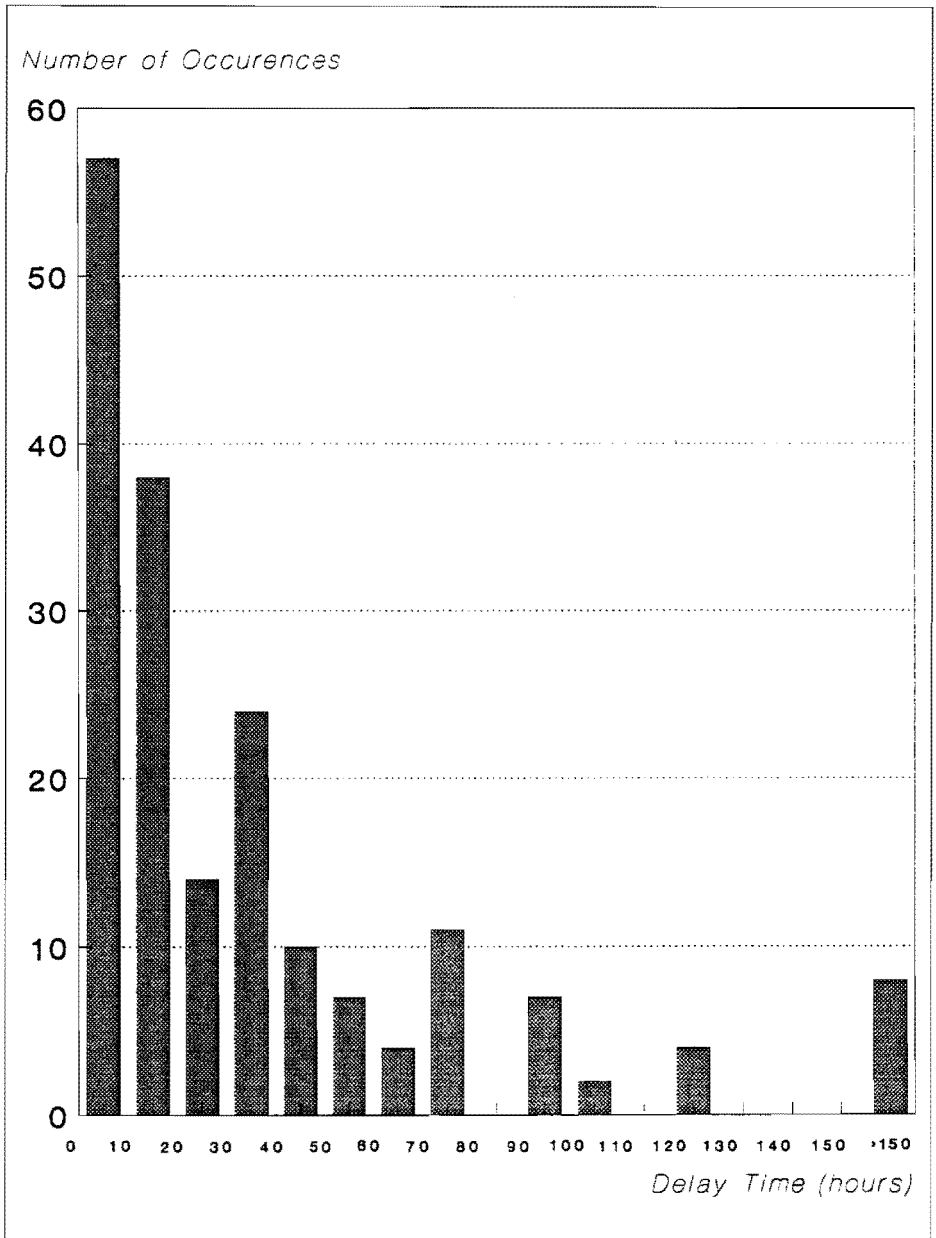


Figure 10. Delay time histogram for Canning Line Faults

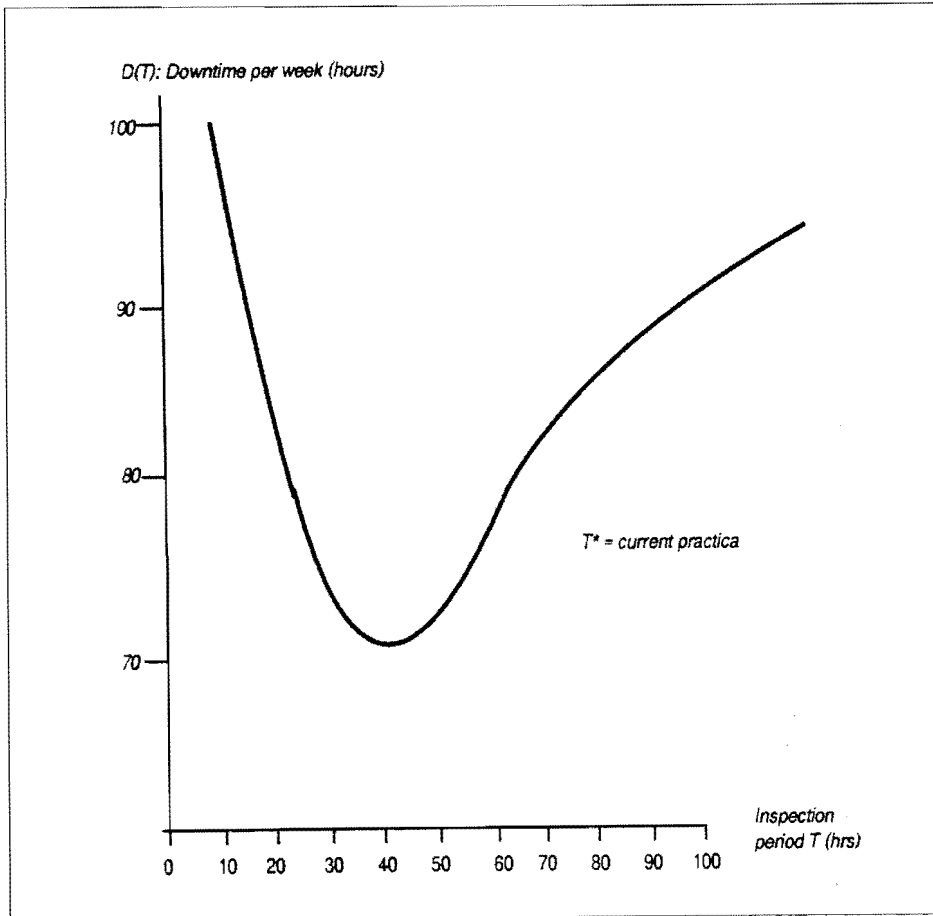


Figure 11. Model of Canning Line downtime per week for various inspection periods*

It is noted from figure 11 that the option value of T is about 30 hours, but the 'correct' solution is in fact 24 hours, since compared to a 24 hour period, a 30 hour period is complex to work and would require a substantial additional return to justify the effort. Seemingly, the 24 hourly inspection practice, which had evolved over the previous 5 years through engineering judgement, was in fact about the best that could be achieved with the plant. What is now known, and was not known before, is the fact that 24 hourly inspections actually was about optimal, and that in seeking improvements management could feel free to switch its critical eye onto other aspects of the plant.

7. Plant modification

When undertaking snap-shot and delay time modelling of plant, the survey data set upon which the models are substantively (though not exclusively) based is, of course, dependent upon the plant as operating time of the survey. The question therefore arises as to how to model the plant if design changes are proposed follow the snap-shot modelling. It is going to be necessary, for example, to wait until sufficient experience has been obtained with modified plant before a snap-shot survey can be re-run prior to modelling the maintenance ?

The answer of 'no' will be exemplified in the context of the canning line downtime model.

It is recalled that following the snap-shot model of the canning line, management tasked a small group of engineers to investigate the valve faults and propose design improvements. Meanwhile the downtime modelling exercise was continued on the basis of the existing plant and the downtime model produced demonstrated the optimality of current maintenance practice for the plant as it was. Within days of the model being completed and presented to management, it was announced that the valves had been redesigned, a prototype tested, and a full production batch of 40 modified valves manufactured and were ready for use. The main modification was to design out a number of valve faults by using a continuous casting to remove a trouble some flange, and also to make some design changes to the seamer lever.

Surprisingly, perhaps, it was found that the new model of downtime per week to be expected from the as-yet-untried plant could be determined and supplied to Management within a matter of hours. Quite simply, the model for the probability of a defect arising as a breakdown, $b(T)$, with the new plant was obtained by removing from the histogram all delay time estimates associated with faults expected to be removed, and recalculating the function $b(T)$ for the modified plant. Also, the number of defects arising per week was reduced by the number designed out, and the new model for $D(T)$ determined. In the canning line case, the model for the modified plant is given in figure 12.

Clearly, the model of figure 12 is very different to the earlier mode, figure 11, for the current plant. The response of management was to revise the long-standing daily inspection and move to weekly inspections with the modified plant. A year later, the weekly inspection period was still operating successfully. Without modelling, it is most unlikely the plant would have been redesigned when it was, or having been redesigned, it is unlikely the inspection period would have been extended to one week. Also, whatever inspection period was chosen, whether or not it was in any sense 'the best' would have been unknown. As it was, the issue was clear and management attention could confidently be diverted elsewhere.

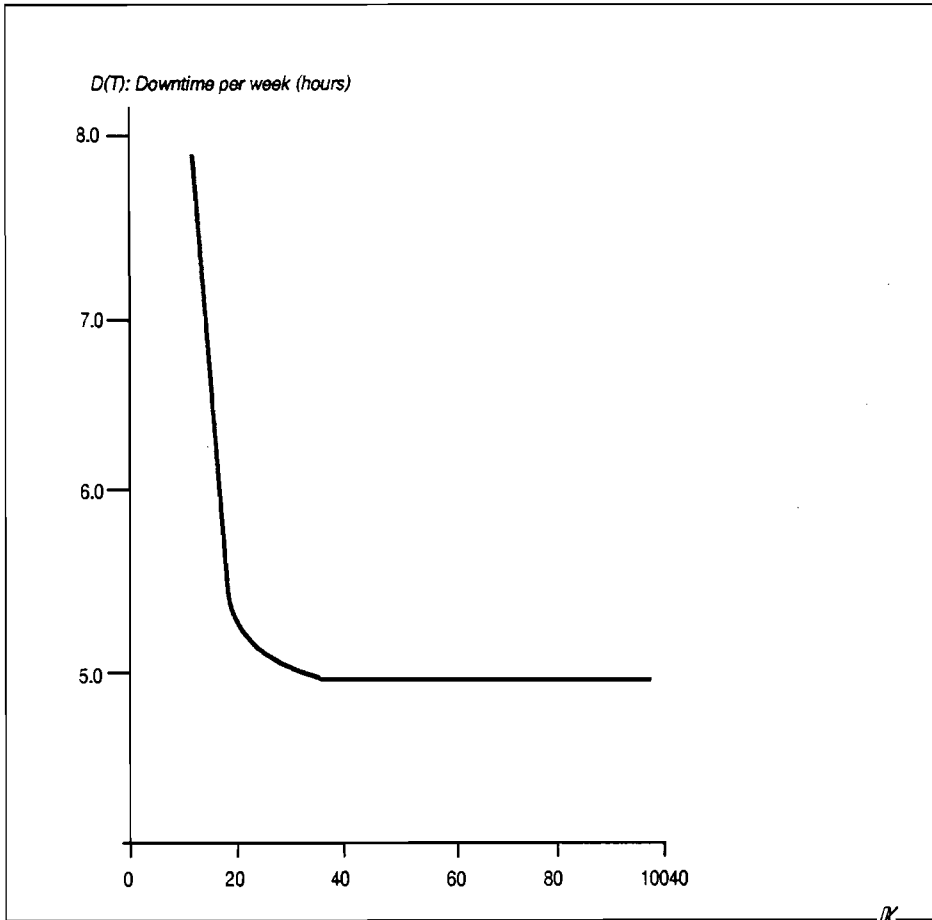


Figure 12. Model of modified Canning Line downtime per week for various inspection periods

8. Summary and conclusion

This paper has attempted to introduce maintenance modelling as a necessary aspect of efficient cost effective maintenance for production. It is argued that routinely collected data is insufficient for maintenance modelling and that special snapshot type surveys need to be established for a limited period. These surveys collect a substantive amount of subjective data – representing engineering judgement in well defined situations.

Snap-shot modelling is used to highlight amongst other things whether the number of defects may be reduced, and also whether the consequences of defects may

be reduced. Having identified the plant for modelling; redesigned or otherwise, the concept of delay time analysis may be used to model maintenance practice.

In all of this modelling activity, the combined service of engineers and OR analysts is required. The analyst will in the main extract data and estimates from the engineer, process the data into information, and present it back in a form the engineer can interpret and use for decision-making purposes. The models are in the main really the engineer's models since it is their knowledge which leads in the formulation of the assumptions of a model, albeit in conjunction with an analyst, and it is the set of assumptions that really is the model.

Although when used for decision-making the model has the form of an equation or of a graph, this form is a direct consequence of the modelling assumptions. The engineers have much to contribute in modelling as well as supplying snapshot survey data.

Maintenance modelling requires close and open collaboration between various parties including production, maintenance, analysts and senior-management, the willingness to use both qualitative and quantitative information which can be objective and subjective, and to do so in a scientific manner. This is very much in accordance with the general Deming⁸ philosophy of management. Strong parallels exist here between the methods for maintenance modelling which have been developed over the past twenty years, and Deming's general principles of management.

This paper has presented in a simplified way the basic ideas and concepts of the author's view of maintenance modelling, and done so within a framework of an actual application. There is much to do to extend, refine and simplify the modelling process as well as further validate it. As we have seen from the example, industry can expect to benefit from taking a full and active part in this explorative research process.

Acknowledgements

The author wishes to express his thanks to the Journal of the OR Society (UK) for permission to reproduce some figures from reference⁷.

References

1. Fisher, M., (1990), '*Opportunities for O.R in the new manufacturing*', Proc. XII IFORS Conf. on O.R., pp. 577-585, Ed. H.E. Bradley, Pergamon.

2. Lee, H.L. & Pierskalla, W.P. (1988), *Theory and general models of screening for contagious and non-contagious diseases*, Ops. Res. 87, pp. 428-441, Ed. G.K. Rand, (North Holland).
3. Aghjayan, H.N. (1989), *'Lukeoil analysis expert system'*. Canadian Maintenance Eng. Conference, Toronto.
4. Gits, C.W. (1987), *'On the maintenance concept for a technical system: design framework'*, Maint. Management International, Vol. 6, pp. 223-237.
5. Jardine, A.K.S. (1973), *'Maintenance, replacement and reliability'*, Pitman.
6. Christer, A.H. & Whitelow, J. (1983), *'An Operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition'*, J. Ops. Res. Soc., Vol. 34, pp. 1041-1052.
7. Christer, A.H. & Waller, W.M. (1984), *'Reducing production downtime using delay-time analysis'*, J. Ops. Res. Soc., Vol. 35, No. 6, pp. 499-512.
8. Deming, W.E. (1986), *'Out of crisis'*, Mass. Inst. of Tech., Centre for Adv. Eng. Studies.

Possibilities for integration of production and maintenance scheduling and control

8

*Prof. D.J. Sherwin and A.de Jong
Queensland University of Technology
Brisbane. Australia*

This paper examines the possibilities of integrating production and maintenance control with reference to both the manufacture of discrete items and continuous multistage process plant. Whilst integration of production with block PM schedules has always been quite simple, at least in theory, it is more difficult, but with a computer not impossible, to integrate manufacture with maintenance.

1. Introduction

In both maintenance and production planning significant recent developments have centred on the use of the computer to store data and to plan and control the work. The computer has made it possible to automate the planning and recording of maintenance work for later review and analysis of data.

In production it is an essential adjunct to planning Just-in-time (JIT) manufacture as well as in the direct control of machinery. However, the battles between Maintenance and Production are only intensified by the twin pressures of more complex machinery and the higher productivity required to make it economical. The more complex machinery now in use probably needs more maintenance but does not get it because it is being intensively used to drive the JIT-oriented Computer-Integrated Manufacturing (CIM) system.

CIM in fact now encompasses three-quarters of the whole product cycle from design (CAD) through resource planning (MRP) to manufacture (JIT). However, MRP II and KANBAN systems do not specifically allow for maintenance, and existing maintenance software does not allow for integration of maintenance work with production plans.

The latest MRP II systems are getting more and more integrated with Purchasing, Sales and Accounts, however, this presents the Maintenance manager with the problem of upsetting the heads of all those departments as well when the PM

schedule suddenly says that machinery must be maintained. Clearly integration is desirable or even necessary. Obvious alternatives are that only breakdown maintenance and / or weekend block preventive maintenance is done between the overhaul periods during which production workers take their annual holidays. There are, however, some less obvious possibilities which centre around the ability of advanced MRP II systems to plan work very quickly for minimum time or cost. This enables them to be used to take full advantage of maintenance opportunities arising from the failure of one stage of a series in a production system.

The paper examines some of these possibilities in relation to the capability of commercial software for Maintenance and MRP II and the operation of the JIT/KANBAN system and its attendant philosophy.

2. Literature survey

A computer search was made of recent (post 1980) papers in international journals on JIT, KANBAN and MRP (II) systems. Of 140 papers surveyed only 8⁵⁻¹² made any reference to the integration of the system with maintenance planning for the manufacturing machinery. Only 4⁹⁻¹² were specifically about such integration and only two^{5, 9} described actual applications. One of these⁵ dealt with the problems of salt extraction from the sea in Australia, significantly in a remote area. It was more concerned with using the inventory facilities of the MRP II system than its planning module.

In 1986 the US Society of Manufacturing Engineers held a conference in Sydney, Australia at which 37 papers were read⁴. Only one was about Maintenance and this did not advocate any such integration even though the theme of the conference was the integration and reconciliation of techniques such as JIT, CIM, MAP, CAD/CAM, Group Technology, MRP II and so on. Descriptions and diagrams in books and papers of MRP II, JIT and CIM (Computer Integrated Manufacture) theory, see for example Flack in⁴, pp 3.161-3.175, do not generally include any mention of Maintenance.

Although the effects of Maintenance on both Timeliness and Quality must be obvious to all concerned with manufacturing, the means of integrating planning of Maintenance with planning of Production do not seem yet to exist. Our literature survey has been less thorough than we would wish due to pressure of time, but we would have expected more than eight papers in 140 to mention Maintenance if it was generally felt to be a consideration by the people involved. We find this extraordinary.

Conversely, a survey of available maintenance software suites and a constant watch on the literature over 10 years revealed no case in which integration of

maintenance and production planning was specifically included, although several allowed the planning of maintenance periods' during which (groups of inter-dependent) machines would be made available by the Production department.

3. Characteristics of maintenance planning systems

Most extant Planned Maintenance Systems (PMS) are software equivalents of the paper systems of the previous generation. The grandfathers of these systems were mostly very like the Royal Navy's paper system (which is still in use) and had the following essential features:

- *Asset Register* –
including description, location, serial numbers, drawing numbers, duty and rating figures, handbook number, PM Schedule No etc, with an entry for each machine fitted
- *Maintenance Schedule* –
details of work to be carried out, resources needed and periodicity for each item
- *Maintenance Planning Facility* –
cards for each PM scheduled item for each asset. These could be moved between drawers to provide a body of work planned for each week of the year
- *Asset History File* –
records of overhauls and failures repairs as well as PM achievement are needed
- *Mechanism for Change* –
it is necessary to be able to get the schedule altered in the light of experience and also to report design and material deficiencies to equipment manufacturers or the company's own Planning and Purchasing function for Production Machinery

Some primitive systems computerised or not, omit items 4 and / or 5 and fail to distinguish adequately between schedules and plans. PM achievement may be recorded under 3 or 4 above.

Although current software does not feature modules for using the data generated by PMS's to improve schedules, this will almost certainly be a feature of the next generation⁵. As PM Schedules, and therefore plans, become subject to changes to implement successive optimisations², the case for integration with production schedules and plans becomes stronger.

As the target audience for this paper is specialists in Maintenance we will not further presume to teach colleagues what we can safely assume they already know. We have included this section mainly in the hope that the ideas presented later may be taken up by the specialists in MRP II etc, whose understanding of Maintenance is revealed by the Literature Survey described above to be possibly somewhat sketchy.

4. Characteristics of systems of production planning and control PPCS

This section provides brief and somewhat simplified explanations of the following methodologies involved in Production Planning and Control viz:

- *Just-in-time / KANBAN (JIT)*
- *Manufacturing Resource Planning (MRP II)*
- *Computer Integrated Manufacture (CIM)*

There is also some discussion of their advantages and disadvantages and of their mutual exclusivities compatibilities and applicabilities to:

- repetitive manufacture of discrete complex items (mass production)
- manufacture of bespoke short runs of components or complex items (jobbing shop)
- continuous production of homogeneous products (process plant)

The purpose of this descriptive section is to serve with the previous section as an introduction to a discussion of the possibilities for integrating PMS's with PPCS's which appears in the next section.

Just-in-time (JIT) may be regarded as a philosophy by its advocates but it is really just a method of minimising raw material stocks and work-in progress (WIP) by substituting the pull of demand for the push of the orderbook. The idea is that nothing is made and nothing ordered until there is only just time to make it or get it from a supplier. In Toyota's main works in Japan, where the system originated, cards or KANBANS are used to pass up the line (against the material flow) the authority to make more of a component. The system extends out-side the factory to suppliers of components who must deliver quite small batches to the Toyota unloading bays within 15 minute time windows. They may be asked to make many deliveries per day in this way. Outside suppliers solve the problems of batch size, quality and security of supply in their own way, but internally the JIT system imposes good manufacturing management by:

- minimising lot sizes and therefore WIP
- insisting on 100% quality
- minimising set-up costs
- promoting good housekeeping
- promoting trust between employees by making them directly dependent on one another and responsible for passing the KANBANS

Manufacturing Resource Planning (MRPII) Systems. MRPII systems, in contrast to JIT/KANBAN (which pulls) are said to push the material through the system, scheduling to meet the due-dates of *all* extant orders. The driving forces are timely delivery and maximum customer satisfaction consistent with lowest possible WIP and other inventory, minimum costs and maximum profit. As these aims are mutually conflicting, such systems contain simulation models for optimising the situation.

Figure 1 adapted from Flack's paper in⁴ shows the elements present in an MRP II system. Note that we have added Maintenance to this diagram and that it is not usually considered to be part of MRP II. There are generally said to be three phases or levels of PPC necessary to achieve efficient production and these are all present in MRP II systems.

They are:

- business Plan
- detailed Priority Planning
- execution involving (real-time) adjustment to detailed plan

The Business Planning phase or level includes modelling and optimisation of all resources required to execute a Production Plan which typically is a prediction from Marketing of possible orders which could be obtained if the resources to execute them were present. As these predictions will include prices to be charged as well as paid, it is possible on the basis of total or partial faith in them to optimise the company's assets and labour force to meet the grand design.

In the next, Detailed Priority Planning phase, the system proceeds to demand of its operators Bills of Materials and lead times for components and raw materials. These are compared with stock-in-hand and the capabilities of the assets and work force to produce details of what and when to buy for what delivery dates. The system can allow for scrap and rework, economic order quantities, and uncertainty (distribution) in times, quantities and realised orders. This was the point at which early MRP systems finished leaving execution to the usual vagaries but providing nevertheless a solid base upon which to run the business by judicious adjustments on the run. Day-to-day management consisted of comparing projected with actual, and perhaps running some sort of smoothed projection of the future trends for variables such as Sales, Productivity, Delivery (Timeliness), Costs etc.

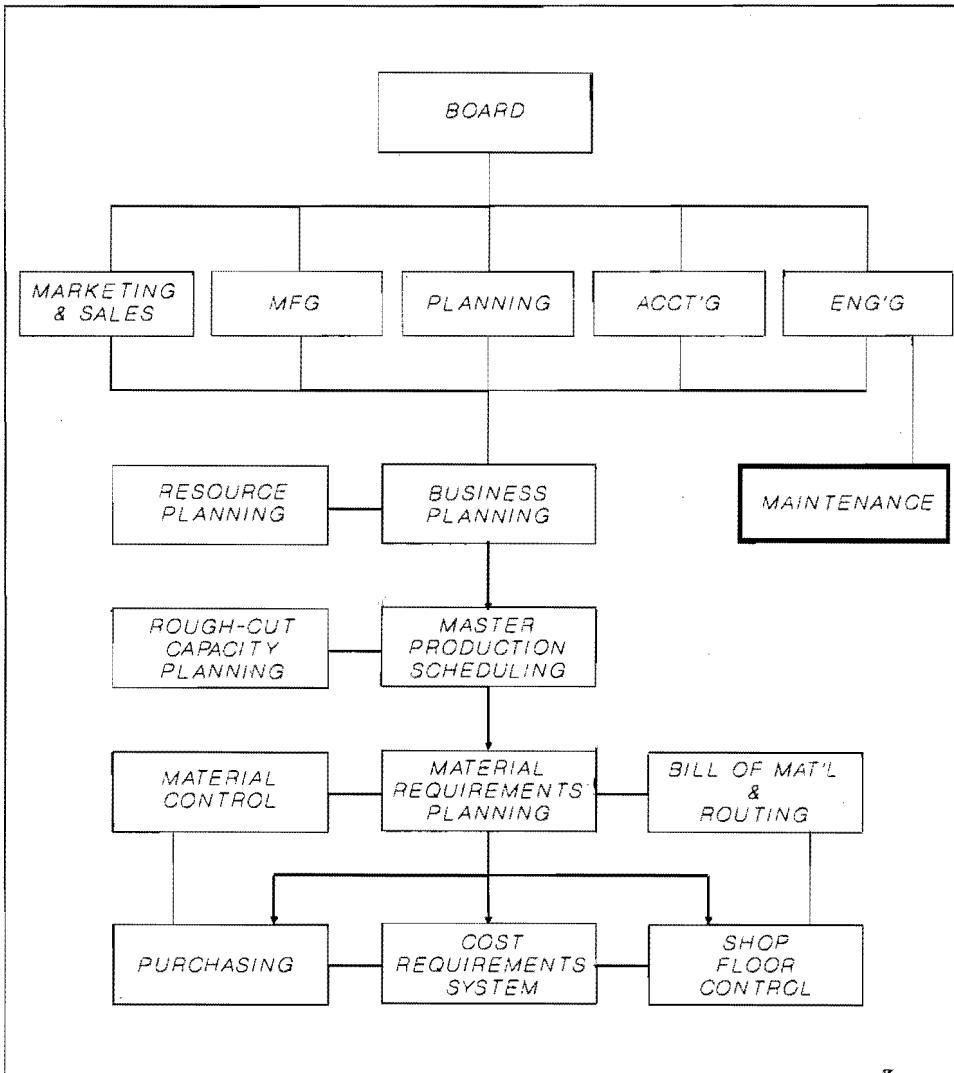


Figure 1. MRP I system (after flack)

MRP II (as opposed to plain MRP) Systems also model the Execution phase, sometimes in real time. The system continually adjusts the Detailed Priority Plan to keep up with order-book reality, placing or cancelling orders with suppliers monitoring all the variables above and many more that were previously tracked by graphs on office walls. MRP II also finds the best way of executing each order including detailed material timing and routing, identification of over- and under-loading of assets followed by short-term best solutions to optimise the situation including declining offered work if necessary. The system can be varied to apply to both make-for-stock and make-to-order, but is more useful for the latter.

MRP II is also a Management Information System (MIS) with, in its more sophisticated variants, the ability to suggest solutions to problems and always the capacity to predict the out-come of suggested executive initiatives. If properly used and applied it can go a long way towards optimising the conflict between customer satisfaction, costs, profit and inventory.

Computer integrated Manufacture (CIM). CIM is a system that provides integrated computerised systems to handle all the phases of the Product Cycle from Design Feasibility Study to Delivery to Customers. An outline of such a system is shown in figure 2 from which it will be seen that the concept of MRP II is included within it.

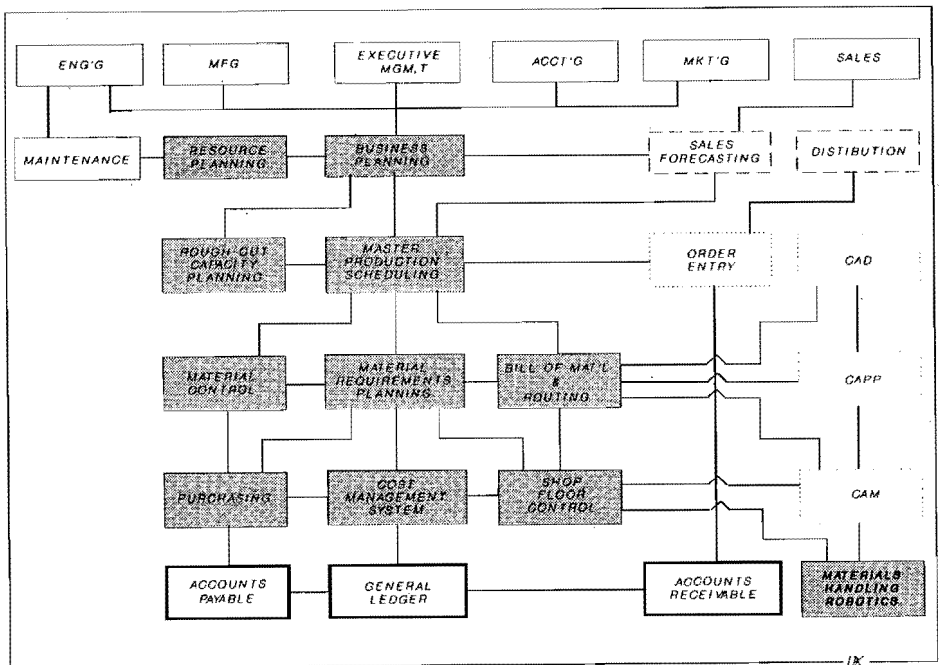


Figure 2. CIM system

In this figure we have again had to add the Maintenance function under Engineering as in figure 1. In CIM *everything* is integrated except Maintenance!

In a true CIM system, the computer is central and passes all instructions, usually suggesting what should be done subject to executive veto. Designs are made upon the CAD system and converted by the Computer Aided Process Planning (CAPP) system and the Computer-Aided Manufacture modules into instructions for ordering materials and making components. Robotic devices move material from station to station under central computer control. Even the Sales and Purchasing systems are integrated but significantly not Maintenance. Yet the whole edifice could come down without PM.

5. Discussion

We note that in JIT the insistence on no waste, small lots and reduced set-ups drives the system towards automated flexible manufacturing systems such as CNC machining cells and that the quality imperative usually implies preventive maintenance. Being a Japanese system most of this PM is intended to be done by the operators between KANBANS. JIT itself does not contain any means of warning those downstream of impending or actual difficulties with the machinery, and, strictly speaking, the operator would be in breach of standing instructions if s/he were to make a small buffer stock in anticipation of a period of downtime for PM or to repair a defect which was starting to affect quality. The whole idea of buffer stocks is anathema to JIT because it takes up space and ties up money in working capital. It has also been pointed out that under JIT it is much easier to measure machine and operator idle times and so to adjust the manufacturing asset-stock and the workforce to suit the required production rates in mass production. Judgement of when the KANBAN should be passed back is left to the downstream operator or supervisor whereas in fact the upstream operator or supervisor usually has a better idea of how long the lead time for the next batch is likely to be in the light of machinery condition and manning levels actually pertaining. The downstream section only knows its own current rate of consumption, which also may change. JIT is therefore by no means perfect and can introduce delays where a more specifically pre-planned system such as MRP II would not. On the other hand, MRP II allows for scrap and rework whereas JIT drives the system towards reduction of waste of both time and materials. However, it is possible to invoke the JIT-philosophy in an MRP II-controlled environment. In a jobbing shop JIT would have to be modified considerably. The assembly and test section at the end of the production facility would presumably ask first for those components needed to complete orders with the closest promised delivery dates. There would have to be consultation between supervisors which would in effect result in a crude order of manufacture after checks that the raw materials would be there in time. This would not be very satisfactory compared with computerised optimisation of lead times with the facility to update in the light of actual events, which advanced MRP II systems provide.

A principal advantage of JIT is said to be its lack of paperwork. Apart from the KANBAN's, which can be made of plastic and recycled, in a mass production situation, there is indeed very little paperwork associated with JIT as such. However, in a jobbing shop there would have to be much more. In MRP II systems there is a tendency to produce too much paper, but this can be controlled by providing terminals for reference and input of reports instead of printouts and forms.

Both JIT and MRP II were devised in the context of discrete manufacture rather

than continuous processes. In a true continuous plant MRP II is probably an overkill except in the case of multi-product petrochemical and plastics manufacture where the product mix needs continual adjustment either side of mean values to meet current orders. Food processing plants tend to be batch-oriented, as much for quality control as mechanical convenience, and many chemical plants are batch or semi-batch. In both food and chemicals it is desirable to save on storage costs of both raw materials and products and usually possible to adjust to some extent the speed of operations. JIT would be useful for example in the production of biscuits (cookies) or pasta of various types to order with maximum freshness assured, but MRP II might well make greater savings by addressing the economics of batch sizes and optimising, rather than just reducing to practical minima, buffer stocks of raw materials and finished goods. The more perishable the raw materials and products and the more variety in the possible products the more attractive JIT becomes.

In CIM, both JIT and MRP II can be incorporated, the former as a general policy of avoidance of waste and excessive stock holdings rather than a specific KANBAN system. As figure 2 shows, it is logical to incorporate MRP II as a subset of CIM when the functions that it controls are of sufficient complexity to warrant it. Usually if CIM is warranted then an advanced MRP II system should be incorporated in it.

6. Possibilities for integration with PMS's

Rational. Before discussing how integration of PMS with MRP II or JIT might be achieved it is first appropriate to look at why it would be desirable. Actually it would be more to the point to ask the progenitors of both schemes why PMS was omitted and why it does not even occur on the CIM chart. To be fair, JIT advocates the incorporation of Total Productive Maintenance, a system which sounds very grand but seemingly only amounts to involving shop floor workers in the servicing and maintenance of the machines they tend and making them responsible for calling out the specialists as required. There is no real appreciation of the need for assured periods of planned downtime to carry out PM in either JIT or MRP II.

The omission probably arises from the practice of carrying out PM in dead time not required for production, usually weekends and a period each year when everyone else is on holiday. This practice puts up the cost of maintenance work because it often involves paying premium labour rates because of the inconvenience as a high percentage on top of the deservedly high rates paid to skilled craftsmen. There is therefore a good financial incentive to plan PM for periods in normal working hours during which the machine is not scheduled for production.

Much maintenance in modern industry is now condition-based. In this case the lead times for preventive actions may be quite short and the effects upon the production schedule potentially severe. Once again there is reliance upon deadtime at weekends etc to get this type of work done, when a computerised planning and costing system could possibly allow the work to be done at lower cost.

MRP II & PMS. There are similarities between the Schedules and Plans of a 'standard-issue' PMS and the Business Plan and Detailed Priority Planning phases of MRP II. These similarities are sufficient to make it possible to use an MRP II system to plan PM. Most MRP II systems will adjust easily to the type of resource allocation and planning that is needed in maintenance. Indeed the system is really taking a sledge hammer to a nut. Of course, the PMS planning module is usually easier to use because it was designed especially for Maintenance. Given an installation with both systems available, a reasonable compromise might be to plan the jobs on the PMS to establish time and resource requirements and then include them in the MRP II plan as simple delays (absorbing no other resource than time). Otherwise all the resources available to the Maintenance department must be entered on the MRP II system which may overcrowd its memory facilities. However, the small number of articles which do address this idea^{9, 10, 11} all advocate doing the maintenance resource planning as well as the time planning on the MRP II system. The MRP II system will 'know' when particular machines will be idle for a while and can be fed with the PM time and resource requirements. There is no reason why PM on the machine should not be treated in the same way as other jobs except where the MRP II is operated to maximise profit in a jobbing shop with too many offers of work. In this case PM will be seen as work done at a loss and therefore be continually put off. This can be overcome by assuming that a failure will occur if the PM is omitted with a probability cost which increases with the time since the due date. If the cost (loss of profit) of the failure is a function $C_F(t)$ of this time and the cost of PM is fixed at C_M then the putative gain in profit to be made by carrying out the PM rather than allowing the failure to occur is $C_F(t) - C_M$. This will increase with time until the PM is eventually worked into the Production Plan as a job worth doing. This way of thinking about PM is potentially very useful when contesting the need to stop a machine with a Production Manager holding a full order book. It is an attempt at least to put a price on the omission of PM.

The MRP II system could also possibly be used for planning overhauls and annual shutdown periods in order to take maximum advantage of the absence of production requirements. However, project planning software such as PERT is probably better for this function because it was specifically designed to handle one-off rather than continuous or repetitive problems. Even so, the ordering of materials and spare parts in advance could probably be better handled by MRP II. Also,

MRP II has facilities for detailed planning of manufacturing operations which are adaptable to the purposes of detailed planning and (especially) calculating the duration of complicated overhaul jobs by breaking them down into elemental operations.

JIT & PMS. In this case the possibilities are much reduced. The incorporation of TPM into the JIT concept has already been discussed. JIT of course requires in theory absolute reliability which, again in theory, requires infinite PM! Yet JIT theory makes no concession towards the need to plan preventive work. It is very difficult indeed to see how a true KANBAN system can be compatible much less integrated with a PMS. The nature of the system makes it impossible to even guess how long it will be before a machine is needed once more. It is significant that three out of four papers⁹⁻¹² which consider integration advocate MRP II systems rather than KANBAN, and the fourth advocates PM without explaining how it should be planned under JIT. Problems would be even greater under condition-based maintenance.

CIM & PMS. MRP II is usually an integral part of CIM systems so all the same remarks and ideas would apply. CIM generally also includes the design or specification of manufacturing machinery required to make a new product. Integration at this point in the product cycle would be useful if it led to early consideration of the maintenance requirements of such new machinery or alterations to those of existing plant to be used in new ways. Terotechnological considerations including costs of ownership and expected life of plant could usefully be considered as part of the development of products as well as of the machinery to make them.

In a good CIM system, full simulation of the production system should be possible. If it is, then the reliability, maintainability and PM of the machines should also be simulated. In mass production and process plants this simulation would lead to a cost-based assessment of the need for buffer stores between stages of production considered as alternatives to redundancy for expensive machines. This will be particularly useful in assessing the capacity of existing plant to accommodate different products or increased production rates or how best to spend a limited sum on improvements. Such simulations can also provide information on the effects of changes to the workforce, particularly the numbers of skilled maintenance fitters.

7. Conclusions

- Maintenance planning seems to have been neglected by those who devised MRP II, JIT, and CIM systems.

- The JIT philosophy advocates and requires PM but does not go beyond the somewhat vague concepts of TPM in explaining how it can be planned.
- It is difficult to see how JIT/KANBAN could be modified to include the planning of maintenance.
- In contrast, MRP II is eminently suitable for such integration and would probably lead to great benefits by allowing work now done at premium rates in unsocial hours to be performed in normal working time.
- Computer-based PMS planning systems will continue to be needed because not all types of plant warrant full MRP II system.
- MRP II is not entirely suitable for planning annual shut down periods. Critical path analysis software is better for this purpose but MRP II can be useful for detailed planning.
- In full CIM there is really no excuse for not incorporating the PMS and other terotechnological functions into the system.
- Production system simulations should include the reliability, maintainability and PM of machinery and optimisation of redundancy and buffer store capacity.

References

1. Sherif YS and Smith ML (1981) 'Optimal maintenance models for systems subject to failure – a review', Naval Research Logistics Quarterly 28, 47-74 (524 References!)
2. Sherwin DJ (1984) 'Improved schedules by using data collected under preventive maintenance', IEEE Transaction on Reliability R-33, 4, 315-320.
3. Sherwin DJ (1990) 'Design for a comprehensive maintenance planning recording and optimisation system', Engineering Costs and Production Economics 20, 37-42.
4. Automach Australia (1986) 'Conference Proceedings Society of Manufacturing Engineers 1', SME Drive PO Box 930 Dearborn Michigan 48121 USA.
5. Cook M (1989) 'Managing logistics in remote locations: a case study', International Journal of Physical Distribution and Materials Management 19, 10, 34-40.
6. Oishi O (1989) 'Building a JIT Pyramid', Society of Manufacturing Engineers Technical Paper MS89-402 ISSN 0161-6382.
7. Funaki Y (1989), 'Beyond just-in-time: total preventive maintenance', Semi-conductor International 12, 10, 162-165.
8. Lowe PJ (1988) 'Remodelling of Crewe workshops – the OPUS programme', Railway Engineer 4, 26-29.
9. Raeker RH (1986), 'Preventive maintenance planning with an MRP II system' Proc Am Int Conf APICS Falls Church Va USA p 1-3, ISBN 0-935406-83-2.
10. Russel SP (1985) 'Capacity planning for preventive maintenance: pay me now, or pay me later', Proc Am Int Conf APICS Falls Church Va USA p 101-104, ISBN 0-935406-72-7.

11. Ettkin LP and Jahnig DG (1986) '*Adapting MRP II for main tenance resource management can provide a strategic advantage*'. Industrial Engineering 18, 8, 50-59.
12. Lee Q (1985) '*Scientific maintenance and JIT*', Manufacturing Systems 3, 12, 4448.

Productiebeheersing en informatietechnologie

Ontwikkelingen in perspectief

9

Prof.dr.ir. J.W.M. Bertrand
Prof.dr.ir. J.C. Wortmann

Het gebruik van informatiesystemen en informatica-technologie in de industrie is de laatste decennia sterk toegenomen. We noemen met name gebieden als: financiële beheersing en budgettering, personeelsadministratie, machineregistratie en onderhoudsbeheersing, de produktontwikkeling en procesontwikkeling, de fabricage en de distributie, en tenslotte ook de goederenstroombeheersing, en meer in het bijzonder de produktie- en de voorraadbeheersing.

De ontwikkeling en invoering van de nieuwe informatiesystemen heeft een grote invloed gehad op de organisatie. Bepaalde taken en functies werden geëlimineerd; de inhoud van bepaalde taken en functies werd gewijzigd, en ook ontstonden er nieuwe taken, verantwoordelijkheidsgebieden en organisatorische relaties.

1. Inleiding

De diffusie van informatietechnologie in organisaties ontwikkelde zich hierbij langs twee lijnen. Langs de ene lijn werd op vele plaatsen lokaal informatietechnologie geïntroduceerd in bepaalde delen van de organisatie. Dit leidde geleidelijk tot lokaal veranderende organisatievormen, waaraan de wijdere omgeving zich op een zeker moment ook aanpaste. Dit proces staat bekend als 'eilandautomatisering'. Het voordeel van deze aanpak is dat nieuwe informatietechnologieën snel en zonder al te veel indirecte kosten kunnen worden geïntroduceerd. Het nadeel van de aanpak is dat er een grote kans bestaat op het ontstaan van vele verschillende subsystemen binnen een organisatie, die noch syntactisch noch semantisch kunnen communiceren.

Als het voor een organisatie van strategisch belang is integraal het produktievermogen te verbeteren, dan kan het bestaan van een aantal geïsoleerde automatie-eilanden een ernstige hinderpaal zijn. In dat geval doet een organisatie er verstandig aan de andere lijn te volgen. Deze lijn houdt in, dat er eerst informatie-

stelsystemen worden gespecificeerd die een weergave zijn van de visie van het bedrijf op wat integrale beheersing voor haar inhoudt. Vervolgens wordt een informatiesysteem conform de specificatie gekocht of ontwikkeld en ingevoerd. Het voordeel van deze lijn is natuurlijk dat er geen automatie-eilanden ontstaan; er is gewerkt vanuit een gemeenschappelijk begrippenkader en de communicatie tussen deelsystemen is gegarandeerd. Het nadeel van deze lijn is echter gelegen in het gegeven, dat het moeilijk blijkt te zijn om in grote tot middelgrote organisaties tot overeenstemming te komen over wat verstaan moet worden onder 'integrale beheersing'. Verschillende personen hebben vaak verschillende gezichtspunten en opvattingen. Deze gezichtspunten en opvattingen kunnen ook na verloop van tijd, en met het opdoen van ervaring, veranderen. Daarnaast blijkt het zeer moeilijk te zijn om integrale systemen in alle delen van een organisatie te introduceren. Het goed functioneren van een integraal systeem vereist vaak dat het in alle of vele organisatiedelen wordt geaccepteerd en gebruikt. Vaak blijken echter verschillende afdelingen een sterk verschillend belang te hebben bij de invoering van een automatiesysteem.

Een organisatorische functie die zich sterk leent voor het gebruik van integrale beheersing is de goederenstroombeheersing. In dit artikel bedoelen we met goederenstroombeheersing de beheersing van de voortbrengingsprocessen en de voorraden, gericht op het voorzien van de vraag van de klanten. In de zeventiger jaren is het Manufacturing Resources Planning concept (MRP-II) ontwikkeld als een standaardstelsysteem voor de goederenstroombeheersing. Oliver Wight kan beschouwd worden als de grondlegger van MRPII. In het 'Standard System' (Wight and Landvater, 1983) legde hij de specificaties vast waaraan zijns inziens een integraal goederenstroombeheersingssysteem moet voldoen. De afgelopen decennia zijn er vele MRP-II systemen ontwikkeld, op de markt gebracht en ingevoerd in vele bedrijven. Soms met succes, maar vaak liep zo'n invoering uit op een grote teleurstelling. Daar kunnen vele redenen voor worden aangevoerd, zoals onvoldoende specificaties van de behoeften, keuze van de foute hardware-configuratie, te hooggespannen verwachtingen met betrekking tot de resultaten, een ondoordacht invoeringsproces, slecht projectmanagement gedurende de invoering, etcetera.

Echter een belangrijke reden voor het frequente achterblijven van de gerealiseerde baten bij de verwachtingen is ons inziens gelegen in de gebrekkige aansluiting van wat de standaardsoftware biedt bij de behoefte van de organisatie; een behoefte die overigens vaak pas duidelijk wordt gedurende de invoering. Het is blijkbaar moeilijk om van te voren duidelijk vast te stellen wat de behoefte is, en na te gaan of een informatiesysteem inderdaad voldoet aan de specificaties. Verder moeten we ons ook de vraag stellen of een standaardstelsysteem wel kan voorzien in de behoefte van elke mogelijke goederenstroombeheersingssituatie die er in de praktijk bestaat. Reeds in 1981 vindt men in het APICS tijdschrift een artikel waarin wordt gesteld dat een MRP-II systeem niet geschikt is voor de proces

industrie (Taylor, 1981). Ongeveer in dezelfde tijd worden kanttekeningen geplaatst bij het gebruik van het beheersingsconcept achter MRP-II voor engineer-to-order bedrijven; dit zijn bedrijven die op klantorder klantspecifieke producten ontwikkelen en maken.

De vraag mag dus worden gesteld of het mogelijk is in elke bedrijfssituatie hetzelfde standaardstelsel toe te passen, of dat we toe moeten naar een aantal standaardstelsels, elk toegesneden op een bepaald type bedrijf. Als het laatste het geval is, welke zijn dan de verschillende typen beheersingssituaties die moeten worden onderscheiden en welke is dan de architectuur van de verschillende bedrijfstypespecifieke standaardstelsels? Zijn dit enkel varianten van het reeds bestaande Standard System, en kunnen ze uit dit Standard System ontwikkeld worden, of moet er voor de ontwikkeling van deze stelsels een geheel verschillende systeemarchitectuur opgezet worden?

In dit artikel gaan we in op deze vragen en komen we tot voorlopige antwoorden. Het artikel is als volgt opgebouwd. In paragraaf twee behandelen we de interactie tussen goederenstroombeheersingssystemen in informatiesystemen. We maken hierbij onderscheid in een aantal verschillende manieren waarop informatietechnologie kan bijdragen aan de goederenstroombeheersing. We zullen hierbij zien dat de bijdrage van informatietechnologie sterk afhangt van de aard van het beheersingsprobleem dat opgelost moet worden. Vervolgens presenteren we in paragraaf drie een eenvoudige typologie van productiebeheersingssituaties en tonen daarbij aan dat de aard van het beheersingsprobleem voor elk van de onderscheiden situaties sterk verschillend is. Daarna gaan we in paragraaf vier in op de ontstaansgeschiedenis van standaard MRP-systemen. We laten zien dat dit stelsel ontstaan is uit bedrijfsspecifieke software die ontwikkeld werd in een bepaald type produktiesituatie. Deze bedrijfsspecifieke software had in vele gevallen als oogmerk zowel de goederenstroom en de budgettaire beheersing binnen een stelsel te integreren. Vervolgens geven we in paragraaf vijf voorlopige antwoorden op de hoofdvragen in dit artikel. Deze antwoorden zijn gebaseerd op de noodzaak in de productie- en voorraadbeheersing onderscheid te maken tussen enerzijds goederenstroombeheersing, en anderzijds productie- afdelingsbeheersing. Dit onderscheid wordt belicht vanuit de kenmerken van de nieuwe informatietechnologieën die de afgelopen vijf tot tien jaar beschikbaar zijn gekomen. Tenslotte sluiten we het artikel in paragraaf zes af met een korte samenvatting van de conclusies.

2. Productiebeheersing en Informatiesystemen

In dit artikel omschrijven we productiebeheersing als de planning en beheersing van het volume en de tijdige beschikbaarheid van capaciteit en materialen door middel van verwervingsopdrachten, productieopdrachten en voorraadbeheersing in produktiesystemen, met als doel het kunnen accepteren en uitleveren van

klantorders (zie Bertrand, Wijngaard, Wortmann, 1990²). Deze omschrijving heeft betrekking op alle aspecten en niveaus in de beheersing.

In complexe produktiesystemen is de besluitvorming met betrekking tot de produktiebeheersing verdeeld over vele organisatorische functies, posities en soms zijn er zelfs combinaties van functies die in commissies, bepaalde beslissingen nemen. Een belangrijke fase in het ontwerp van een produktiebeheersingssysteem is de specificatie van de beheersingsstructuur. De totale beheersingsstructuur is gedefinieerd als de verzameling van beslisfuncties, en de relaties tussen deze beslisfuncties. In het algemeen eisen we dat de beheersingsstructuur aansluit bij een goede decompositie van het totale beheersingsprobleem in subproblemen. Dit houdt in dat:

- elke beslisfunctie betrekking heeft op een subprobleem dat op een eenvoudige manier samenhangt met andere subproblemen. Hierdoor wordt het mogelijk autonome taakgroepen te creëren (zie Galbraith, 1973).
- elke combinatie van subprobleem en beslisfunctie toegewezen kan worden aan een organisatorische positie, of combinatie van posities. Hierdoor wordt het mogelijk een verantwoordelijkheidsstructuur te creëren (zie ook Meal, 1984, Bertrand, Wortmann, Wijngaard, 1980¹).

De produktiebeheersingsstructuur van een industrieel bedrijf moet rekening houden met de mogelijkheden en beperkingen die voortvloeien uit de gebruikte fabricagetechnologie, de informatietechnologie en de organisatiestructuur. Ten gevolge van ontwikkelingen in de fabricagetechnologieën en in de informatietechnologie kunnen bepaalde beperkingen en mogelijkheden verdwijnen, en andere kunnen ontstaan. Het gevolg hiervan kan zijn dat de organisatiestructuur en ook de structuur van het produktiebeheersingssysteem wijzigt. De eisen die gesteld worden aan een informatiesysteem worden afgeleid uit de informatiebehoefte van de organisatorische posities binnen een structuur. Als de structuur wijzigt, dan kunnen dus ook de informatiebehoeften wijzigen. We zien dat nieuwe informatietechnologieën, zoals elektronische communicatiesystemen, kunnen leiden tot nieuwe organisatiestructuren, en tot nieuwe beheersingsstructuren, en vervolgens weer tot nieuwe informatiebehoeften. In deze zin genereert de ontwikkeling van nieuwe informatietechnologie nieuwe mogelijkheden voor betere produktiebeheersing, met als gevolg dat bestaande investeringen in informatietechnologieën onrendabel kunnen worden.

Gezien de omvangrijke investeringen die vaak gedaan moeten worden in opleiding en training bij invoering in integrale informatiesystemen, zijn organisaties vaak nogal terughoudend in het absorberen van nieuwe technologieën die niet passen bij de bestaande concepten en systemen. Hieruit volgt dat een integraal informatiesysteem voldoende flexibel moet zijn om gedurende zijn afschrijvingstermijn te kunnen worden aangepast aan organisatorische veranderingen ten gevolge van ontwikkelingen in fabricagetechnologie, informatietechnolo-

gie, gewenste performance. Dit is de bekende kwestie rond de flexibiliteit van informatiesystemen die uitvoerig is besproken door Wortmann⁴. Een van zijn conclusies is dat absolute flexibiliteit niet bestaat of eindeloos duur zou worden. Informatiesystemen moeten dus worden toegesneden op de gekozen beheersingsstructuur. Wil er dan nog voldoende flexibiliteit overblijven dan moet de beheersingsstructuur zijn gebaseerd op een beperkt aantal karakteristieken van de produktiesituatie. Worden er dat te veel, dan ontstaat vanzelf een grote inflexibiliteit van het afgeleide informatiesysteem. De vraag is nu welke zijn de hoofdfactoren die een produktiesituatie in beheersingsopzicht karakteriseren. Op deze vraag gaan we in de volgende paragraaf in. Maar eerst geven we een opsomming van de belangrijkste bijdragen van informatietechnologie van de productiebeheersing.

Zoals reeds eerder gesteld leggen we in de productiebeheersingsstructuur de belangrijkste subbeheersingsproblemen en hun onderlinge relaties vast. Binnen zo'n beheersingsstructuur kunnen de afzonderlijke subproblemen zeer sterk van elkaar verschillen. Dientengevolge kunnen de informatiebehoeften voor de beslisfuncties sterk uit elkaar lopen, en kan er behoefte zijn aan geheel verschillende soorten bijdragen van informatietechnologie.

De bijdrage van het gebruik van informatietechnologie kan op verschillende aspecten betrekking hebben. De belangrijkste aspecten zijn:

- het elimineren van handmatige routinematige informatieverwerking. Hierdoor worden vooral de beheersingskosten verlaagd.
- het snel kunnen verwerken van grote hoeveelheden gegevens. Hierdoor wordt vooral de reactiesnelheid van een beslisfunctie verhoogd.
- het snel kunnen uitvoeren van complexe berekeningen. Dit leidt er vooral toe dat de kwaliteit van de beslissingen verbetert.
- het snel kunnen doorgeven van gegevens in gedistribueerde informatienetwerken. Dit leidt er vooral toe dat de onderlinge consistentie van de besluitvorming in de verschillende beslisfuncties toeneemt.

Voor verschillende produktiesituaties kan de bijdrage van informatietechnologie op verschillende aspecten betrekking hebben. Maar ook voor een gegeven produktiesituatie kunnen er binnen de gekozen beheersingsstructuur beslisfuncties bestaan die onderling sterk verschillen met betrekking tot het aspect van de informatietechnologie dat een belangrijke bijdrage levert. We hebben dus zowel een classificatie van productiebeheersingssituaties als een algemene structuur van een productiebeheersingssysteem nodig om dit onderwerp goed te kunnen bespreken. In de volgende paragraaf gaan we op deze beide zaken in en zullen we laten zien wat voor elke situatie en functie de belangrijkste informatiebehoeften zijn en hoe informatietechnologie hieraan kan bijdragen.

3. Een classificatie van produktiesituaties

Productie vindt meestal plaats in een of meerdere productiefasen. Een productiefase wordt gedefinieerd als een verzameling fabricagestappen waardoor materialen omgezet worden in tussen- of eindprodukten.

Materialen zijn objecten die verbruikt worden in een productieproces; capaciteiten zijn objecten die gebruikt worden gedurende (een deel) van het productieproces (eenvoudigheidshalve verwaarlozen we hier voortbrengingsprocessen die uitsluitend informatie als input vragen, zoals ontwerpprocessen).

Achtereenvolgende productiefasen worden gescheiden door voorraadpunten. De inhoud (volume en mix) van de voorraadpunten worden beheerst door de functie fabriekslogistiek. Fabriekslogistiek accepteert klantorders en coördineert de productiefasen teneinde de klantorders te realiseren. De coördinatie vindt plaats door afspraken te maken met de productie-eenheden die verantwoordelijk zijn voor de uitvoering van de productiefasen, en die ook ervoor moeten zorgen dat de benodigde capaciteit beschikbaar is. We zien dus dat productie-eenheden kunnen worden beschouwd als autonome organisatorische entiteiten die verantwoordelijk zijn voor de capaciteitsbeschikbaarheid en de realisatie van productiefasen (bijvoorbeeld via het uitvoeren van de werkorders die door de fabriekslogistiek wordt vrijgegeven).

Voor een meer uitvoerige bespreking van deze begrippen verwijzen we naar Productiebeheersing en Materials Management (Bertrand, Wortmann, Wijngaard, 1990²). Binnen het raam van dit artikel volstaan we ermee op te merken dat bij het ontwerp van een productiebeheersingssysteem voor een complexe productiesituatie, het onderscheiden van fabriekslogistiek en productie-eenheden een belangrijke ontwerpfase is.

De verschillende productie-eenheden die er in een bepaalde situatie moeten worden onderscheiden, kunnen sterk van elkaar verschillen. Bij een complexe beheersingssituatie kan het nodig zijn een aantal productie-eenheden te onderscheiden. Echter, zelfs als dit aantal beperkt is, kan het aantal verschillende configuraties van productie-eenheden die door de fabriekslogistiek onderscheiden moeten worden, erg groot zijn. Alleen als een productie-eenheid vanuit de fabriekslogistiek gezien altijd dezelfde karakteristieken heeft, dan wordt Fabriekslogistiek geconfronteerd met een beperkt aantal verschillende coördinatieproblemen. Dit is echter meestal niet het geval, aangezien verschillen in fabricagetechnologie, omvang, opleidingsniveau, en specificiteit van apparatuur en personeel vaak een grote invloed zal hebben op de externe performance van een productie-eenheid. We concluderen dus dat de fabriekslogistiek betrekking kan hebben op de coördinatie van veel verschillende combinaties van typen van productie-eenheden. De vraag doet zich nu voor hoe de productie-eenheden en het resulterende coördinatieprobleem op fabrieksniveau het beste kan worden gekarakteriseerd. Vele kenmerken en aspecten van productie-eenheden kunnen hiervoor worden gebruikt. In dit artikel beperken we ons tot twee aspecten. Deze zijn:

- de complexiteit van de materiaalcoördinatieproblematiek
- de complexiteit van de coördinatie van het capaciteitsgebruik.

Deze tweedimensionale classificatie resulteert in de eenvoudige typologie. Deze onderscheidt de volgende vier elementaire produktiesituaties:

- de procesgewijze fabricage
- de grootserie/massa-assemblage
- de projectgewijze fabricage
- de laagvolume componentenfabricage

De voornaamste kenmerken van deze vier elementaire produktiesituaties zullen vervolgens worden besproken (zie ook Van Rijn, 1985).

– *De procesgewijze fabricage*

In dit artikel omschrijven we de procesgewijze fabricage als de fabricage van grote hoeveelheden van een beperkt aantal soortgelijke enkelvoudige of eenvoudig samengestelde produkten op een geïntegreerde produktieinstallatie. De totale vraag van alle produkttypen is zo hoog dat het economisch gerechtvaardigd is om te investeren in gespecialiseerde fabricagesystemen die elk een zeer hoge produktiesnelheid hebben, en waarbij de systemen zijn gekoppeld via geautomatiseerde transportsystemen vaak voorzien van kleine buffers.

De voornaamste karakteristieken van de procesgewijze fabricage zijn:

- een lage volumeflexibiliteit
- een beperkt aantal produktiefasen
- een lage toegevoegde waarde
- hoge druk op het benutten van de produktiecapaciteit
- relatief hoge materiaalkosten als percentage van de kostprijs
- slechts enkele uitgangsmaterialen, vele eindprodukten (divergente materiaalstroom).

– *De grootserie/massa-assemblage*

Bij de grootserie/massa-assemblage vindt de eindassemblage vaak plaats op hoog geautomatiseerde assemblagelijnen. Vele fabricagestappen zijn geïntegreerd en geautomatiseerde transportsystemen verbinden de fabricagestappen tot een lijn. De voornaamste karakteristieken van de grootserie/massa-assemblage zijn:

- een lage volumeflexibiliteit op de eindassemblagelijlijn
- een hoge korte termijn mixflexibiliteit. Soms kunnen op assemblagelijnen zelfs meerdere types in willekeurige volgorde door elkaar heen geproduceerd worden zonder dat hierdoor capaciteitsverlies optreedt of omstelkosten moeten worden gemaakt

- meerdere produktiefasen, vaak bestaande uit een aantal parallelle produktielijnen die aan de eindassemblagelijijn toevoeren
 - een relatief lage toegevoegde waarde
 - een grote druk op het vermijden van capaciteitsleegloop
 - vele onderdelen en subsamenstellingen nodig voor de fabricage van elk eindprodukt (een convergente materiaalstroom).
- *De projectgewijze fabricage*

Bij de projectgewijze fabricage bestaan de produkten uit complexe systemen die worden vervaardigd op klantorder, en vaak ook klantspecifiek zijn. De realisatie van een project vraagt vaak de inzet van zeer verschillende technologieën, en de verwerving van heel verschillende componenten en subsystemen. Het fabricageproces bestaat uit meerdere fasen die elk de inzet van een hoog gekwalificeerd personeel vereisen. Echter de meeste benodigde machines en menscapaciteit is niet hoog gespecialiseerd en eenvoudig te verwerven. Veel werk aan een project kan worden uitbesteed als eenvoudig.

De belangrijkste karakteristieken van de projectgewijze fabricage zijn:

- een hoge volumeflexibiliteit
- een hoge mixflexibiliteit
- een complexe capaciteitsstructuur bestaande uit vele verschillende soorten capaciteit
- een matig hoge toegevoegde waarde
- vele verschillende uitgangsmaterialen, componenten en subsystemen nodig voor een eindprodukt (een convergente materiaalstroom)
- korte termijn beheersing van materiaalbeschikbaarheid en gebruik, en van capaciteitbeschikbaarheid en - gebruik is een moeilijk probleem
- produktontwikkeling, ontwerp en werkvoorbereiding zijn fasen van het produktieproces
- de specifieke details m.b.t. een produkt worden geleidelijk aan bekend gedurende het realisatietraject.

– *De laagvolume componentenfabricage*

Bij de laagvolume componentenproductie bestaat het eindprodukt uit enkelvoudige of eenvoudig samengestelde produkten. De produktie vindt plaats op klantorder, omdat de vraag per type produkt laag tot zeer laag is. De fabricage van elk produkt vereist vaak een aantal verschillende professionele technologieën.

De belangrijkste karakteristieken van de laagvolume componentenfabricage zijn:

- een hoge volumeflexibiliteit, voornamelijk ten gevolge van de mogelijkheid tot uitbesteden
- een hoge mixflexibiliteit

- slechts een of twee produktiefasen
- een complexe capaciteitsstructuur
- een eenvoudige materiaalstructuur
- een hoge toegevoegde waarde
- een laag materiaaltaandeel in de kostprijs.

Deze vier elementaire produktiesituaties en hun karakteristieken kunnen afgezet worden tegen de kenmerken van MRP-II systemen. In de volgende paragraaf zullen we eerst de oorsprong van MRP-systemen aan de orde stellen en vervolgens zullen we voor elk van de elementaire produktiesituaties afleiden hoe de produktie in grote lijnen moet worden beheerst. Tegelijk zullen we deze gewenste beheersing afzetten tegen de mogelijkheden van MRP-II.

4. MRP in relatie tot de vier elementaire produktiesituaties

MRP is ontwikkeld voor een fabricage van complex samengestelde produkten op herhalingsbasis in grote tot middel-grote series. Het hart van MRP-II is het MRP-I systeem, het systeem met behulp waarvan op basis van de produktiestuklijsten de materiaal behoeften per produktiefase berekend wordt. Het berekenen van de materiaalbehoefte is een moeizaam proces als we te maken hebben met complexe stuklijsten, bestaande uit meerdere niveaus en met vele gemeenschappelijke subsamenstellingen en onderdelen.

Complexe produkten worden meestal gefabriceerd in verscheidene produktiefasen, gebruikmakend van verscheidene produktieeenheden. De essentie van MRP-II kan als volgt worden samengevat.

MRP-II veronderstelt dat er een relatief stabiele stuklijst is voor elk eindprodukt. Deze stuklijst verandert slechts geleidelijk in de tijd. De stuklijsten worden omgezet in produktiestuklijsten, teneinde de voorraad-items vast te leggen die beheerst worden door de Fabriekslogistiek, en waarvoor produktie-orders worden vrijgegeven naar de produktie. Dit is de interne materiaalstroomcoördinatie die vaak in de automatisystemen is geïntegreerd met de budgetteringssystemen. Capaciteitsbeheersing en capaciteitsbenutting is een hiervan afgeleide activiteit. Binnen MRP-II is het mogelijk op vele plaatsen checks uit te voeren met betrekking tot de beschikbaarheid van capaciteit in relatie tot de geplande materiaalstroom, maar dit kan niet worden omgedraaid. Het is niet mogelijk om uit, onder andere, de capaciteitsbeschikbaarheid en het gewenste capaciteitsgebruik af te leiden wat de materiaalstromen zouden moeten zijn.

Uitgaande van deze karakterisering van MRP-II bespreken we nu voor elk van de vier elementaire produktiesituaties de bruikbaarheid van MRP-II.

– *De procesgewijze fabricage*

De meeste procesgewijs werkende bedrijven maken gebruik van een beperkte verzameling uitgangsmaterialen. Vele producten worden gemaakt uit gemeenschappelijke uitgangsmaterialen. Sommige bedrijven (zoals staalfabrieken, zuivelverwerkende bedrijven en dergelijke) hebben daarnaast te maken met een op langere termijn vastgestelde, en op korte termijn onbeïnvloedbare, aanvoer van grondstoffen die binnen een beperkte tijd moeten worden verwerkt tot eindproduct.

We mogen daarom concluderen dat er in procesgewijs werkende bedrijven weinig behoefte zal zijn aan de beslissingsondersteuning die geboden wordt door een op complexe produktiestuklijsten gebaseerd systeem. De materiaalvoorziening is of lang van te voren geregeld, of eenvoudig te regelen met elementaire voorraadbeheersingssystemen.

Bij de procesgewijze fabricage is de beheersing primair gericht op het efficiënte gebruik van de inflexibele capaciteit van de hoofdproductielijn; de klantorderacceptatie of de voorraadbeheersing wordt direct gekoppeld aan de totale beschikbare capaciteit, en de consequenties hiervan voor het kunnen realiseren van het productieplan. Het productieplan is direct afgeleid van het produkt- en klantbeleid, en is tevens gebaseerd op het klantorderleveringsbeleid (servicegraad). Men kan op voorraad of op klantorder produceren; in beide gevallen echter is het voor een goede beheersing noodzakelijk om van te voren een capaciteitsgebruiksplan op te stellen (zie Bitran en Hax, 1977, of Bertrand, Wortmann, Wijngaard, 1990²).

Het capaciteitsgebruiksplan wordt op korte termijn omgezet in een productieplan. Hierbij wordt rekening gehouden met de randvoorwaarden met betrekking tot seriegroottes en omsteltijden, zoals volgordeafhankelijkheid van omsteltijden en de mogelijkheid tot het vormen van produktgroepen met binnen de groep lage omsteltijden. Dit soort randvoorwaarden leidt vaak tot cyclische of pseudo-cyclische productieplannen. Vanuit deze productieplannen wordt afgeleid wat gegeven de korte termijn materiaalbeschikbaarheid het klantorderboek of de voorraadpositie, de productie-opdrachten zijn die gestart moeten worden. We zien dat deze werkwijze omgekeerd is ten opzichte van de MRP-II werkwijze.

We concluderen hieruit dat de beslissingsondersteunende informatiebehoefte in de procesgewijze fabricage sterk afwijkt van wat geboden wordt door een MRP-II systeem. De sterke kenmerken van MRP-II zijn hier niet erg van nut, terwijl de MRP-II geen directe ondersteuning biedt met betrekking tot de capaciteitsplanning, die hier kritisch is.

– *De grootserie/massa-assemblage*

Bij de grootserie/massa-assemblage is de beheersing primair gericht op de benut-

ting van de inflexibele en dure eindassemblagecapaciteit, en de coördinatie van de onderdelen en sub-samenstellingen die nodig zijn voor de verschillende produktieseries in de eindassemblage.

Vaak is de eindassemblage via voorraden of veiligheidstijd ontkoppeld van de aanvoer en produktie van onderdelen en subsamenstellingen. De klantorderacceptatie is gebaseerd op beschikbare capaciteit en materialen. De produktieplanning en materiaalvoorziening van de eindlijnen zijn in moderne fabrieken vaak gebaseerd op flowprincipes, in plaats van op de klassieke werkorderuitgiftes per produktieserie. Moderne MRP-systemen kunnen de materiaalcoördinatie voor dit type eindassemblagelijnen goed ondersteunen. Het klassieke MRP-II concept is primair geschikt voor de materiaalcoördinatie van de fasen voor de massa-eindassemblage, en voor de grootseriefabricage van subsamenstellingen. Materiaalcoördinatie over meerdere in serie en/of parallel geschakelde produktiefasen hier het dominante beheersingsaspect. MRP-II systemen zijn in principe geschikt voor dit type beheersingssituatie.

– *De projectgewijze fabricage*

Bij de projectgewijze fabricage is het aantal af te leveren produkten per jaar relatief laag. De fabricage van elk produkt is te beschouwen als een apart project dat een eigen besturing vraagt, vanaf de start (de offerte en klantorderacceptatie) tot het einde (de installatie en afnametest van het produkt bij de klant).

Er zijn drie essentiële karakteristieken van de projectgewijze fabricage die consequenties hebben voor de te gebruiken produktiebeheersingsinformatiesystemen:

- bij acceptatie van de klantorder, is de exacte inhoud van het produkt vaak nog niet (geheel) bekend. Een gedeelte van de ontwikkeling en ontwerp van het produkt is klantorderspecifiek en moet nog in detail plaatsvinden. Dit betekent dat er bij de start van de order nog geen complete stuklijst beschikbaar is. De stuklijst wordt geleidelijk aan compleet gedurende het ontwikkelen en ontwerpproces. Hieruit volgt dat elke klantorder een klantorderspecifieke stuklijst heeft. Er wordt niet gewerkt met een standaard produktstuklijst die voor vele klantorders gebruikt kan worden maar met gedeeltelijk klantorderspecifieke stuklijsten. Tenslotte geldt dat; de produktie- en inkoopopdrachten voor vele onderdelen direct gekoppeld zijn aan de klantorder waarin deze onderdelen gebruikt zullen worden. Dit houdt in dat ook de opslag van deze produkten in de magazijnen, klantorder-gericht en niet produktgericht zal zijn.

Een standaard MRP-II systeem is echter niet geschikt voor de beheersing van een op klantorder werkende organisatie met klantspecifieke produktie. MRP-II gaat uit van het gebruik van standaard produktstuklijsten voor het coördineren van de goederenstroom, gericht op het vervaardigen van een beperkte verzameling eindprodukten met een hoge herhalingsgraad per produkt.

- De ontwikkel- en ontwerpfase moet net zoals de fabricage, beheerst worden

in het kader van de beheersing van de klantorderdoorlooptijd. De ontwikkel- en ontwerpafdeling produceert in feite documenten met de specificaties van het produkt. Deze documenten kunnen beschouwd worden als 'produkten', die als 'uitgangsmateriaal' of input dienen voor de volgende fases in de uitvoering van de order, zoals inkoop en werkvoorbereiding. Een standaard MRP-II systeem biedt echter geen mogelijkheden om de ontwikkel- en ontwerpafdeling aan te sturen. Daar komt nog bij dat bij de start van een order enkel grove, of geaggregeerde informatie beschikbaar is over de order, de produktstructuur en de capaciteitsbehoefte. Dit houdt in, dat in deze fase de goederenstroombesturing nog niet kan plaatsvinden op grond van gedetailleerde stuklijst en routing-informatie. We moeten in deze fase kunnen werken met projectmanagementtechnieken, waarvoor in standaard MRP-II geen faciliteiten beschikbaar zijn.

- Elke klantorder leidt tot een produkt dat getest, gedocumenteerd en geïnstalleerd moet worden bij de klant en dat daarna ook regelmatig onderhouden en eventueel aangepast moet worden. Er is per produkt een produktspecifieke documentatieset nodig die de produktieconfiguratie weergeeft (de configuratie 'asbult', die zorgvuldig onderscheiden moet worden van de commerciële configuratie, van de ontwikkelstuklijst en ook van de produktiestuklijst. De vervaardiging en beheersing van deze configuratieinformatie is een cruciaal onderdeel van de produktie. Standaard MRP-II biedt echter geen ondersteuning voor het produceren en beheersen van produktconfiguraties.

- *De laagvolume componentenfabricage*

Bij de laagvolume componentenfabricage (de zogenaamde job-shop) zien we dat elk produkt slechts een of een klein aantal uitgangsmaterialen vergt, die vaak kunnen worden vervaardigd uit standaard- of handelsmateriaal.

De materiaalbehoefteberekening en -beheersing is zo eenvoudig dat dit soms wordt overgelaten aan de werkvoorbereiders die voor elke order het materiaal 'uittrekken' en bestellen bij de 'huisleverancier'. Het aantal produktiefasen is meestal beperkt tot een of twee. Dus de coördinatie over de fasen heen (de goederenstroombesturing) is relatief eenvoudig. Dit houdt in dat de sterke eigenschappen van MRP-II in deze situatie van weinig waarde zijn. Het beheersingsprobleem in de laagvolume componentenfabricage is geconcentreerd in de beheersing van de order-doorlooptijden in een produktieafdeling, en in de beheersing van het capaciteitsgebruik. Het hoofddoel is vaak het realiseren van een hoge capaciteitsbenutting met behoud van een concurrerende levertijd en leverbetrouwbaarheid. Vanwege de lage herhalingsgraad in de vraag per produkt wordt er meestal op klantorder geproduceerd. Klantorderacceptatie vindt plaats op basis van capaciteitsbenuttingsprofielen (zie Van Ooijen en Van de Wakker, 1991) die gebaseerd is op het bedrijfsbeleid met betrekking tot customer service en efficiency. De kern van het beheersingsprobleem in deze situatie is het gegeven dat de produktiecapaciteit bestaat uit een groot aantal verschillende technolo-

gieën die onderling niet uitwisselbaar zijn, en dat de vraag naar capaciteit per technologie (bewerkingssoort) op de korte termijn zeer sterk kan variëren. Bij de klantorderacceptatie moet dus simultaan gelet worden op tijdige capaciteitsbeschikbaarheid van vele capaciteitssoorten. Standaard MRP-II ondersteunt deze werkwijze niet of niet voldoende. Standaard MRP gaat uit van standaardlevertijden per produkt die gebruikt worden voor de off-setting in de tijd van de aantallen in het Hoofd Produktie Programma ten behoeve van het bepalen van de startmomenten van produktieorders. Een nauwe interactie tussen de acceptatie van individuele klantorders en de gedetailleerde capaciteitsbeschikbaarheid is niet mogelijk.

Standaard MRP beschikt echter wel over een shop floor control module. Deze beslissingsondersteuning in deze module is echter primair gericht op het beheersen van de ordervoortgang in de produktieafdeling, en op de gewenste voortgang vanuit de goederenstroombeheersingsoogpunt. De module biedt maar weinig ondersteuning voor interne beheersing in de afdeling; zoals het beheersen van het totale onderhanden werk naar volume en samenstelling, en het gebruik van de interne flexibiliteit (inzetten flexibele operators, gebruik van alternatieve bewerkingsplekken). In de job shop zijn nu juist deze laatste beheersingsinstrumenten van doorslaggevend belang voor het realiseren van een goede logistieke prestatie. Het standaard MRP-II concept beschouwt een produktafdeling meer als een ahangsel van de goederenstroombesturing, dan als een semizelfstandige organisatorische eenheid, die haar eigen interne beheersingsmiddelen en beheersingsdoeleinden heeft.

– *Discussie*

Uit het bovenstaande mogen we concluderen dat standaard MRP in principe geschikt is voor de grootserie/massa-assemblage, en ook voor de fabricage van complex samengestelde produkten in middelgrote series. Voor alle andere typen produktiesituatie blijft standaard MRP-II in gebreke met betrekking tot een of meer voor de logistieke beheersing cruciale eisen. De meeste beheersingssituaties in de praktijk bestaan uit een mengvorm of combinatie van de hiervoor behandelde vier ideaal-typische situaties. We mogen dus concluderen dat het rechttoe-rechtaan implementeren van een standaard MRP-systeem vaak een riskante zaak is. Het blijkt zeer belangrijk te zijn om eerst de kenmerken van de beheersingssituatie te onderkennen en op grond hiervan vast te stellen aan welke eisen het informatiesysteem dient te voldoen. Vaak zien we dan ook dat bij de meeste MRP-implementaties de software aangepast moet worden, waarbij de kosten die gepaard gaan met de aanpassingen in dezelfde orde van grootte liggen als de kosten van het standaardpakket.

We mogen ons afvragen of dit de beste manier is om produktie-beheersingsinformatiesystemen te ontwikkelen en in te voeren. Zij we niet bezig de MRP-II software 'op te rekken' tot buiten zijn natuurlijke grenzen, en zouden we er niet

beter aan doen op een andere manier naar het productiebeheersingsprobleem te kijken, dat wil zeggen niet vanuit de produktiestuklijst als centraal concept voor de beheersing? Het door ons voorgestelde alternatief is om het productiebeheersingsprobleem te beschouwen op twee niveaus: op het niveau van de interne afdelingsbeheersing of de productie-eenheidbeheersing, en op het niveau van de coördinatie van goederenstromen die gebruik maken van productieafdelingen (de fabriekslogistiek). Dit kan leiden tot een meer evenwichtige beschouwing, waarbij recht gedaan kan worden aan de grote diversiteit die we in de praktijk aantreffen met betrekking tot de soort afdelingssituaties en combinaties van afdelingssituaties in goederenstromen.

5. Een bottom-up beschouwing

Zoals in de vorige paragraaf is duidelijk geworden, bestaat er een grote diversiteit aan produktiesituaties in de praktijk. Verschillende productie-eenheden kunnen verschillende karakteristieken hebben met betrekking tot hun flexibiliteit en complexiteit. Het gevolg hier van is dat elk type productie-eenheid haar eigen interne beheersingssysteem nodig heeft, dat gebaseerd is op de interne structuur en de externe eisen die gesteld worden aan de performance. De kern van de definitie van een productie-eenheid is dat of het mogelijk is om op eenvoudige wijze vast te stellen welke de operationele karakteristieken zijn waaronder een bepaalde externe performance gerealiseerd kan worden. De interne beheersing om deze externe performance te bereiken wordt overgelaten aan de productie-eenheid zelf; de productie-eenheid opereert als een autonome groep (zie ook De Sitter, 1981).

Stel we zouden voor verschillende typen productie-eenheden aparte, specifieke software ontwikkelen ten behoeve van de interne beheersing. In dat geval zouden we wel beschikken over goede interne beheersing per productie-eenheid, maar we zouden niet vanzelfsprekend de mogelijkheid hebben om de coördinatie over de productie-eenheden heen (en tussen de productie-eenheden) te goed te ondersteunen; niets garandeert dat de specifieke informatiesystemen met elkaar of met een centrale beheersfunctie (de fabriekslogistiek) zou kunnen communiceren. Vanuit de fabriekslogistiek gezien houdt een eenvoudige en effectieve coördinatie in, dat er overeenstemming bestaat tussen de fabriekslogistiek enerzijds en de productie-eenheden anderzijds, en tussen de productie-eenheden onderling, over de onderlinge interfaces. Bij de term 'interfaces' moeten we denken aan concepten en definities die gebruikt worden bij de onderlinge communicatie, en de concrete afspraken over hoe de beheersing plaatsvindt. De heersende tendens in grote bedrijven om grote delen van de productie van onderdelen en sub-assemblages onder te brengen bij gespecialiseerde externe toeleveranciers versterkt overigens de noodzaak om heldere en eenvoudige afspraken te maken over de wederzijdse interfaces.

Gegeven de constatering dat de shop floor control concepten in standaard MRP-II te schraal zijn om de grote variëteit van afdelingssituaties die we in de praktijk aantreffen te kunnen afdekken, is een alternatieve weg om bij het ontwikkelen van nieuwe software uit te gaan van de concepten en definities die betrekking hebben op de interfaces tussen fabriekslogistiek en produktie-eenheden. Het ligt dan voor de hand om twee verschillende soorten produktiebeheersingssystemen te ontwikkelen. Ten eerste zouden we beheersingssystemen kunnen ontwikkelen die uitsluitend betrekking hebben op de coördinatie van produktiefasen; de fabriekslogistiek. Elke produktiefase in de goederenstroom wordt toegewezen aan een produktie-eenheid. Deze eenheid wordt gekarakteriseerd met betrekking tot haar operationele condities en te realiseren performance in termen van de algemene concepten en definities die hiervoor voor produktie-eenheden geformuleerd zijn. De afspraken over operationele condities en performance voor een bepaalde produktie-eenheid kunnen beschouwd worden als een specifiek model van het gedrag van deze produktie-eenheid. De fabriekslogistiek coördineert de orderstroom naar de produktie-eenheid rekening houdend met de overeengekomen operationele condities en uitgaande van de daarbij horende performance. De interne produktiebeheersing van de produktie-eenheid richt zich op het kunnen realiseren van de overeengekomen externe performance, ervan uitgaande dat de orderstroom aangeboden door de fabriekslogistiek voldoet aan de overeengekomen operationele condities.

Binnen deze randvoorwaarden kan software ontwikkeld worden voor produktie-eenheidbeheersing, die het mogelijk maakt te communiceren met de fabriekslogistiek en die ook de onderlinge communicatie mogelijk maakt; immers de concepten en termen met betrekking tot de interfaces (operationele condities, performance grootheden) zijn van te voren vastgelegd en voor alle typen produktie-eenheden afgeleid van een algemene standaard. Voor de interne beheersing van produktie-eenheden kunnen we gebruik maken van de nieuwe informatietechnologie die beschikbaar is voor gedetailleerde shop floor control.

In het bijzonder noemen we:

- de real-time on-line gegevens registratiesystemen, met behulp waarvan het mogelijk wordt op elk moment een correct beeld te krijgen van de toestand van de capaciteit (mensen en machines) en van de ordervoortgang. Deze systemen creëren ons inziens een doorbraak in de praktijk van de produktie-eenheidbeheersing. Het gebruik van geavanceerde beheersingsregels wordt pas zinvol als de gegevens waarop de regels worden toegepast accuraat en actueel zijn. Verder bieden deze systemen ook de mogelijkheid om snel en goedkoop geaggregeerde informatie te creëren ten behoeve van de fabriekslogistiek. Echter wil deze geaggregeerde informatie effectief gebruikt kunnen worden, dan moet ze consistent zijn met de begrippen en definities die gebruikt worden op niveau van de goederenstroombeheersing. Dit zal alleen het geval zijn als deze begrippen en definities, net zoals voor de interfaces, eerst vooraf zijn vastgesteld.

- de data-communicatie netwerken die het ons mogelijk maken dat geregistreerde informatie zeer snel op zeer veel verschillende plaatsen beschikbaar te hebben. In combinatie met de real-time on-line gegevensregistratie kan tot een verdere verbetering van de interne beheersing leiden, met name doordat hierdoor automatisch laterale coördinatie ontstaat, zonder dat hiervoor een extra besturingsinspanning moet worden geleverd. Echter dit veronderstelt wel dat op alle plaatsen in de organisatie dezelfde interpretatie gegeven wordt aan een bepaald gegeven; het veronderstelt vooraf gemeenschappelijk vastgestelde concepten en definities met betrekking tot het beheersingsprobleem en het produktiebeheersingssysteem.

In essentie houdt de hier gesuggereerde aanpak in dat de ontwikkeling van informatiesystemen voor produktiebeheersing vooral bottom-up moet gebeuren. De start vindt plaats met het vaststellen van de verschillende afdelingsbeheersingssituaties die er onderscheiden moeten worden, en met het ontwikkelen van concepten en definities nodig om de complete set te karakteriseren. Vervolgens worden de concepten en definities vastgesteld die betrekking hebben op de interfaces. Tenslotte worden de verschillende goederenstroombeheersingssituaties die kunnen voorkomen geïnventariseerd en wordt hiervoor een sluitend stelsel concepten en definities vastgesteld. Binnen deze concepten en definities kunnen er dan systemen ter ondersteuning van de fabriekslogistiek ontwikkeld worden, waarvan de interfaces uit de produktie-eenheden gegarandeerd is. Wellicht ten overvloede merken we op dat randvoorwaarde dient te zijn dat:

- produktie-eenheden maximaal autonoom zijn met betrekking tot het realiseren van de externe doelstellingen
- de coördinatie van de goederenstromen kan gebeuren met een minimum aan coördinatielast. De beste vorm van coördinatie is natuurlijk de soort van zelfcoördinatie die bijvoorbeeld via een Kan Ban systeem wordt gerealiseerd, waarbij de zwaarste coördinatieinspanning gelegen is in het beheersen van de operationele condities waarom de zelfcoördinatie kan werken. Soortgelijke coördinatie mechanismen moeten ontwikkeld worden voor meer complexe situaties.

6. Conclusies

In dit artikel hebben we ons beziggehouden met de algemene toepasbaarheid van MRP-II software in produktieondernemingen. We zijn eerst ingegaan op de ontwikkelingen in de informatie- systeemtechnologie en de ontwikkelingen in de produktiebeheersing. De bijdrage van informatietechnologie aan de verbetering van de beheersing kan sterk verschillen van situatie tot situatie; dit hebben we nader uitgewerkt aan de hand van vier elementaire produktiesituaties; de pro-

cesgewijze fabricage, de grootserie/massa-assemblage, de laagvolume componentenfabricage, en de projectgewijze fabricage.

Voor elke situatie zijn we ingegaan op de dominante aspecten van de beheersingsproblematiek, en hebben de hieruit volgende eisen voor de informatievoorzieningen gecontrasteerd met wat MRP-II software kan bieden.

Onze conclusie is dat standaard MRP-II niet geschikt is voor productiebeheersingsbeslissingsondersteuning in de procesgewijze fabricage, de projectgewijze fabricage, en de laagvolume componentenfabricage.

Vervolgens hebben we laten zien langs welke lijnen productie- beheersingssoftware ontwikkeld moet worden zodanig dat rekening wordt gehouden met de enorme diversiteit aan beheersings- situaties die er in de praktijk voorkomt. De kern van de aanpak is om te starten vanuit de definitie van productie-eenheden en het vaststellen van interne consistentie en een dekkende verzameling concepten en definities met betrekking tot de interfaces tussen productie-eenheden onderling en de fabrieks- logistiek. We hebben betoogd dat deze concepten en definities een vitale voorwaarde zijn voor het volledig kunnen benutten van de mogelijkheden van nieuwe informatietechnologieën zoals real-time on-line data capture systemen en data-communicatie- netwerken.

Literatuur

1. Bertrand, J.W.M., Wortmann, J.C. en J. Wijngaard (1), *Production controle: A Structural and Desing Oriented Approach*, Elsevier, Amsterdam, 1990.
2. Bertrand, J.W.M., Wortmann, J.C. en J. Wijngaard, *Productiebeheersing en Material Management (2)*, Stenfert Kroese Leiden 1990.
3. Bitran, J.R.en A.C. Hax, *On the Design of Hierarcical Production Planning Systems*, Decision Sciences, vol. 8, 1977, pp. 28-55.
4. Galbraith, J.R., *Designing of Complex Organisations*, Addison Wesley, 1973.
5. Geraerds, W.M.J. en M. Igel, *Flexibiliteit in Logistiek*, SAMSOM/NIVE, 1989.
6. Koene, B., *Logistiek in de Procesindustrie*, Tijdschrift voor Inkoop en Logistiek, vol. 4, no. 12, december 1988, pp. 32-35.
7. Meal, H.C., *Putting Production Decision where they belong*, Harvard Business Review, 1984, vol. 84, pp. 102-111.
8. Ooijen, H.P.G. van, en A.M. van de Wakker, *Betrouwbaar leveren door beheerst gebruik van flexibiliteit*, Bedrijfskunde, 1981.
9. Rijn, D. van, *Producers door informeren*, Kluwer, Deventer, 1985.
10. Sitter, L.U. de, *Op weg naar nieuwe fabrieken en kantoren*, Kluwer, Deventer, 1981.

Beginnelsen betrouwbaarheids- theorie, betrouwbaarheids- modellen en grafische methoden

10

Dr.ir. J.H.J. Geurts

1. Beginselen betrouwbaarheidstheorie

– Inleiding

Zelden hebben gelijke machineonderdelen, ook al functioneren ze onder gelijke omstandigheden, dezelfde *levensduur*. Hun levensduur is een grootheid die steeds verschillende waarden blijkt aan te nemen. Soms zijn die waarden nauw geconcentreerd rondom een gemiddelde, vaak echter vertonen ze een aanzienlijke spreiding. Dit is de reden waarom de levensduur als kansgrootheid wordt beschouwd, net zoals bijvoorbeeld de uitkomst van een worp met een dobbelsteen.

Betrouwbaarheid wordt gedefinieerd als: 'de kans dat functioneren sinds nieuw zonder storing ten minste een bepaalde gebruiksduur zal voortduren'. Betrouwbaarheid is dus een *kansgrootheid*. Het is dan ook niet verwonderlijk dat begrippen en technieken uit de kansrekening en de statistiek een onmisbare rol spelen bij het beschrijven en begrijpen van grootheden die zijn afgeleid van de betrouwbaarheid, en die bepaalde aspecten van die betrouwbaarheid soms duidelijker tot hun recht doen komen dan de betrouwbaarheid zelf.

Na het onderwerp te hebben afgebakend worden enige kanstheoretische begrippen geïntroduceerd en wordt hun relevantie geïllustreerd voor de onderhoudspraktijk.

Daarbij zal vooral het belang van de zogenaamde *storingsgraads functie* voor de praktijk worden benadrukt.

Voor een inleiding of verkenning in de elementaire begrippen van de kanstheorie wordt verwezen naar Wijvekate¹.

– *Structuur- en gebruiksduurafhankelijke betrouwbaarheid*

De betrouwbaarheidstheorie omvat twee hoofdgebieden: de theorie van de structuurafhankelijke betrouwbaarheid en die van de gebruiksduurafhankelijke betrouwbaarheid.

De *structuurafhankelijke* betrouwbaarheidstheorie houdt zich bezig met het bepalen van de betrouwbaarheid van een, meestal complex, technisch systeem (TS) als functie van de betrouwbaarheden van allerlei subsystemen waaruit het TS is opgebouwd. Het doel van deze theorie is het vinden van een structuur voor het TS die het best voldoet, onder een of ander opzicht, aan de betrouwbaarheidseisen die aan het TS worden gesteld voor de uiteindelijke functie van dat TS.

Een simpel voorbeeld is een verlichtingssysteem dat bestaat uit twee lampen die ieder op zich voldoende zijn ter vervulling van de functie ‘verlichting’.

Er zijn tenminste twee mogelijkheden om een dergelijk systeem te structureren, afgezien van de technische realisatie van zo een systeem, en wel *parallel- of serie* – schakeling van de twee lampen.

Bij de *parallel*-schakeling van de twee lampen schiet het verlichtingssysteem pas tekort als beide subsystemen (lampen) gelijktijdig defect zijn.

Bij *serie*-schakeling schiet het verlichtingssysteem tekort zodra ook maar één van de twee subsystemen niet kan functioneren. Als in beide gevallen de lampen dezelfde betrouwbaarheden hebben, heeft het systeem met parallelschakeling van lampen een grotere betrouwbaarheid dan het systeem met serieschakeling.

Uit dit voorbeeld blijkt duidelijk dat de structuur van de samenhang tussen de twee subsystemen (lampen) de betrouwbaarheid van het (verlichtings)systeem als geheel beïnvloedt.

De *gebruiksduurafhankelijke* betrouwbaarheidstheorie bestudeert de betrouwbaarheid van subsystemen en onderdelen als functie van de geaccumuleerde gebruiksduur.

Omdat de betrouwbaarheid een dalende functie is van de gebruiksduur, zal in een subsysteem of onderdeel na verloop van de nodige gebruiksduur een storing optreden. Dit heeft onder meer tot gevolg: het wegvallen van een of meer functies van het systeem als geheel, afhankelijk van de structuur van het systeem. Het optreden van storingen kan vermeden of verminderd worden door het plegen van onderhoud.

De gebruiksduurafhankelijke betrouwbaarheidstheorie heeft tot doel: het leveren van kanstheoretische informatie ten behoeve van het vaststellen van gebruiksafhankelijke onderhoudsregels en hun normatieve onderhoudsinterval. Die informatie is onontbeerlijk omdat gebruiksafhankelijke onderhoudsregels gebaseerd zijn op statistische kennis van levensduren van subsystemen en onderdelen.

Een voorbeeld, weer aan de hand van het reeds genoemde verlichtingssysteem, is het volgende.

Gegeven het feit dat lampen na een variabel aantal branduren falen, rijst de vraag: is het effectief, teneinde het optreden van storingen te vermijden of te verminderen, om een lamp of beide lampen na een bepaald aantal geaccumuleerde branduren te vervangen door nieuwe, nog voordat de oude defect zijn ?

Als het antwoord positief is dan mag *preventief vervangen* niet gebeuren na een te klein aantal branduren, want dan wordt er teveel werk gedaan en worden er teveel lampen met een groot aantal onbenutte branduren weggegooid; maar ook niet na een te groot aantal branduren, want dan wordt de kans dat één of beide lampen al doorgebrand zijn te groot.

Wat is nu het 'juiste' aantal branduren voor preventieve vervanging ?

En als een lamp, ondanks regelmatige preventieve vervanging, toch defect raakt tijdens het gebruik, is het dan verstandig beide lampen te vervangen, of alleen maar de defecte ?

Het antwoord op deze vragen kan alleen worden gegeven door analyse van de betrouwbaarheid van de lampen als functie van het aantal geaccumuleerde branduren.

Uit het voorgaande blijkt, dat

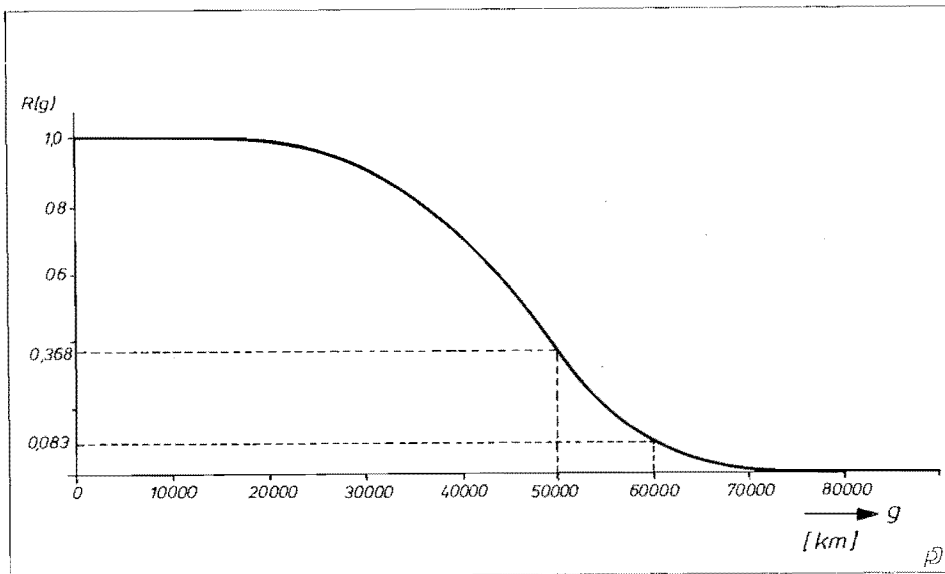
- de structurele betrouwbaarheidstheorie vooral behulpzaam kan zijn bij het ontwerpen, het evalueren en het modificeren van de structuur van een TS
 - de gebruiksduurafhankelijke betrouwbaarheidstheorie vooral bij het (her)ontwerp van het onderhoudsconcept van een technisch systeem (TS).
- *Overlevingskarakteristiek*

In de grafische weergave (zie figuur 1) van een overlevingskarakteristiek staat het verloop van de waarde van de betrouwbaarheid, aangeduid door het gebruikelijke symbool R (E: Reliability) als functie van de geaccumuleerde gebruiksduur, die is aangeduid door het symbool g .

Om ons eraan te herinneren dat de betrouwbaarheid R een functie is van de geaccumuleerde gebruiksduur g schrijven we meestal $R(g)$.

Opgemerkt wordt dat de betrouwbaarheid, die een kans is, wordt uitgedrukt in een dimensieloos getal tussen 0 en 1, de grenzen inbegrepen. De waarde van de betrouwbaarheid neemt af als de gebruiksduur toeneemt.

De waarde is 1 bij 0 gebruikseenheden, en na een zeer groot aantal gebruikseenheden nadert hij tot 0. Er wordt daarbij dus kennelijk verondersteld dat een nieuw onderdeel ook echt nieuw is en niet al zodanig ongeschikt is, dat het zijn functie meteen al niet kan uitoefenen. Dit laatste is een weergave van het feit dat



Figuur 1. Overlevingskarakteristiek banden

geen enkel onderdeel, onder welke gebruiksomstandigheden dan ook, een oneindig groot aantal gebruikseenheden kan blijven functioneren.

Verder is het van belang op te merken dat niet kalendertijd de maat is voor de gebruiksduur. De gebruiksduur moet worden uitgedrukt in de maat die het beste het uitputtingsproces karakteriseert van het in het onderdeel opgeslagen nut. Dus bijvoorbeeld afgelegd aantal kilometers in het geval van een autoband maar aantal doorstane landingen – en eventuele starts – in het geval van een vliegtuigband. De gebruiksduur kan vaak wel, indien nodig, worden vertaald naar kalendertijd. Indien men uiteindelijk geïnteresseerd is in het tijdstip waarop storing optreedt en in de tijdstipmomenten, waarop onderhoud moet plaatsvinden, zal een omrekening plaatsvinden van gebruikseenheden naar de tijd. De gebruikssintensiteit is de daarvoor te bezigen omrekeningsfactor.

De *betrouwbaarheid* $R(g)$ kan als volgt worden geïnterpreteerd.

De Nederlandse wet bepaalt dat een band, met minder dan 2 mm profiel, zich niet meer in de fysieke toestand bevindt die nodig is voor het functioneren van een band. Dat wil in betrouwbaarheidstermen zeggen dat er een (*normatieve*) storing optreedt bij het bereiken van 2 mm profieldiepte.

Stel dat er is een grote verzameling gelijksoortige autobanden van bijvoorbeeld 1.000 stuks, die allemaal aan het einde van hun levensduur zijn gekomen doordat het rubberprofiel is afgesleten tot 2 mm diepte. Van die banden is bekend dat ze onder gelijksoortige omstandigheden gefunctioneerd hebben totdat de 'storing' optrad, en van iedere band is de geaccumuleerde gebruiksduur bekend op het

moment van de storing. Wij veronderstellen dat het aantal afgelegde kilometers-tot-storing van die banden kan worden beschreven door de overlevingskarakteristiek van figuur 1.

In de praktijk is het verband tussen R en g , dat wil zeggen ($R(g)$), natuurlijk nooit precies bekend en gegeven, zodat het uit een, meestal beperkt, aantal experimenten of gebruiksgegevens moet worden geschat.

Vooralsnog wordt verondersteld dat alle mogelijke punten van $R(g)$ wél precies bekend zijn hetgeen ondermeer het volgende betekent:

DE FRACTIE BANDEN DIE 90.000 KM HEEFT OVERLEefd BEDRAAGT: 0,000;

DE FRACTIE DIE 0 KM HEEFT OVERLEefd BEDRAAGT: 1 KM

DE FRACTIE BANDEN DIE MEER DAN BIJVOORBEELD 50.000 KM HEEFT GELOPEN, VOORDAT DE STORING OPTRAD, BEDRAAGT: $R(50.000 \text{ KM})=0,368$

DAT WIL ZEGGEN DAT BIJ DE 1.000 BANDEN ER $0,368 \times 1000=368$ STUKS ZIJN, DIE MEER DAN 50.000KM ZIJN MEEGEGAAN.

COMPLEMENTAIR BEDRAAGT DE KANS DAT EEN WILLEKEURIGE BAND MINDER DAN 50.000KM IS MEEGEGAAN:

$$(1000-368) / 1000 = 0,632$$

VOOR EEN ANDERE WAARDE VAN DE GEBRUIKSDUUR – BIJVOORBEELD BIJ 60.000KM – KAN WORDEN AFGELEZEN DAT DE KANS OP OVERLEVEN NOG MAAR 0,083 (= 8,3 %) bedraagt.

Stel nu dat de 1.000 versleten banden waar we het over hebben gehad bestonden uit de helft van een onder uniforme omstandigheden gefabriceerde produktieserie van 2.000 banden, en dat de overige 1.000 banden nog ongebruikt en nieuw zijn. Dan kan ook met veel vertrouwen worden gesteld dat een willekeurig uit de resterende 1.000 nieuwe banden gekozen band een kans van 0,368 heeft om meer dan 50.000 km mee te gaan, mits hij wordt gebruikt onder dezelfde omstandigheden als de al versleten banden. Evenzo bedraagt de kans dat een nieuwe band meer dan deze 60.000 km mee zal gaan 0,083 (zijnde 8,3%).

– Kansdichtheid

In deze paragraaf wordt een eigenschap van de betrouwbaarheid behandeld die noodzakelijk is voor het begrijpen van de storingsgraad, die verderop wordt behandeld, en die een zeer belangrijke rol speelt in de betrouwbaarheidstheorie. Ter inleiding wordt wederom het bandenvoorbeeld gebruikt, dat geïllustreerd is in figuur 1.

DE BETROUWBAARHEID IS BIJ 50.000KM: $R(50.000)=0,368$ EN IS BIJ 60.000KM: $R(60.000)=0,083$

DAT WIL ZEGGEN DAT ER 368 VAN DE 1000 BANDEN MEER DAN 50.000 KILOMETER ZIJN MEEGEGAAN EN SLECHTS 83 VAN DE 1000 MEER DAN 60.000 KILOMETER.

DAT BETEKENT DAT BIJ $(368-83=)285$ BANDEN DE storing (2mm.profiel) IS OPGETREDEN ERGENS TUSSEN DE 50.000 en 60.000 KILOMETER.

WORDT ER EEN WILLEKEURIGE BAND UIT DEZE 1.000 GEKOZEN, DAN KAN WORDEN GECONCLUDEERD DAT ER EEN KANS VAN :

$$285 / 1000 = 0,285$$

BESTAAT DAT HET ER EEN ZAL BLIJKEN TE ZIJN, DIE TUSSEN 50.000 EN 60.000 KILOMETER AAN ZIJN EIND IS GEKOMEN TENGEVOLGE VAN SLIJTAGE. DEZE KANS, GEMIDDELD OVER DE LENGTE VAN HET INTERVAL TUSSEN DE 50.000 EN 60.000 KILOMETER, BEDRAAGT DAN: 0,285 PER 1000 KM, OF 0,0000285 PER KM.

WE ZEGGEN: DE GEMIDDELDE KANSDICHTHEID TUSSEN 50.000 EN 60.000 KILOMETER VOOR HET OPTREDEN VAN DE GEBEURTENIS storing BIJ EEN WILLEKEURIG GEKOZEN BAND BEDRAAGT:

$$\frac{\text{DIMENSIELOOS GETAL}}{\text{DIMENSIE VAN DE GEBRUIKSEENHEID}} = \frac{0,368 - 0,083}{10.000} = 0,0000285 / \text{KM}$$

Zo kan ook de gemiddelde kansdichtheid worden uitgerekend over het interval tussen 50.00 en 55.000 kilometer en het interval tussen 50.000 en 52.500 kilometer.

We krijgen dan:

$$\frac{(0,368 - 0,200)}{5000} = 0,0000366/\text{KM} \text{ EN } \frac{(0,368 - 0,279)}{2500} = 0,0000356/\text{KM}$$

oftewel: 0,336 respectievelijk 0,356 per 10.000 kilometer.

Naarmate de lengte van het interval na 50.000 km steeds kleiner wordt gekozen, blijkt de gemiddelde kansdichtheid over dat interval steeds meer naar een bepaalde waarde te naderen.

In ons geval is die bepaalde waarde ongeveer:

$$\frac{0,368}{10000} = 0,0000368 \text{ KM}$$

In meer algemene termen kunnen we nu het volgende zeggen. De waarde van de gemiddelde kansdichtheid over het interval tussen de gebruikswaarden g_1 en g_2 bedraagt:

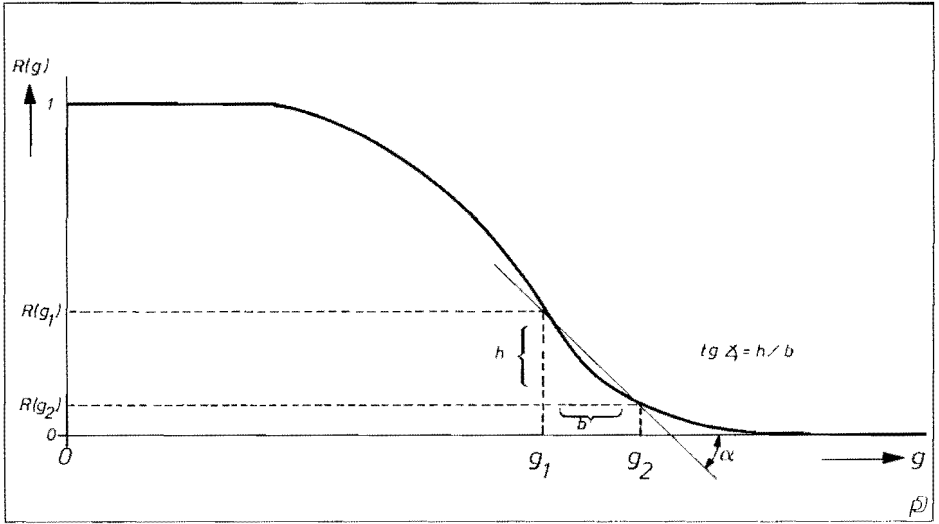
$$\frac{\{ R(g_1) - R(g_2) \}}{(g_1 - g_2)}$$

Naarmate g_2 dichter naar g_1 nadert, nadert de waarde van de gemiddelde kansdichtheid over het interval $g_2 - g_1$ dichter naar de waarde van de tangens van de scherpe hoek die gemaakt wordt door de raaklijn aan de overlevingskarakteristiek in het punt g_1 en de g -as (zie figuur 2).

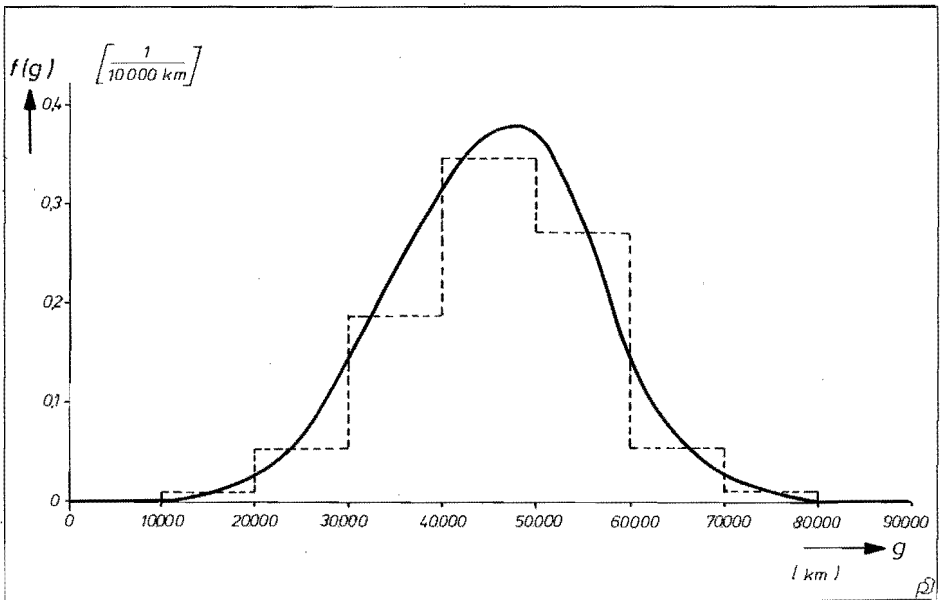
Deze limietwaarde van de gemiddelde kansdichtheid noemen we:

de waarde van de kansdichtheid in het punt g_1 .

Dit wordt aangegeven met het symbool $f(g_1)$.



Figuur 2. Gemiddelde kansdichtheid.



Figuur 3. Gemiddelde kansdichtheid over 10.000 km intervallen en kansdichtheid behorende bij karakteristiek van figuur 3

In het algemeen is dus de waarde van *de* kansdichtheid voor het falen van een willekeurig gekozen band afhankelijk van de waarde van het aantal geaccumuleerde gebruikseenheden (*g*).

Wij schrijven daarom: $f(g)$.

Figuur 3 toont de gemiddelde kansdichtheid over intervallen van 10.000 kilometer breed en *de* kansdichtheid behorende bij de overlevingskarakteristiek van figuur 1.

Merk op dat de som, van interval-breedte maal gemiddelde kansdichtheid over dat interval, gelijk is aan 1, over alle intervallen, zoals ook volgt uit de berekeningswijze van de gemiddelde kansdichtheid.

– *Storingsgraad*

Wij hebben in de vorige paragraaf de kans besproken dat de levensduur van een willekeurig gekozen band (uit een populatie van 1.000 stuks) beëindigd zal blijken te zijn in een bepaald interval, zeg tussen g_1 en g_2 .

Ook hebben wij de gemiddelde kansdichtheid voor het optreden van een storing over een interval besproken en de kansdichtheid in een punt g .

De storingsgraad die we hier bespreken is nauw gerelateerd aan de kansdichtheid. Het begrip storingsgraad is wellicht het belangrijkste begrip in de betrouwbaarheidstheorie.

De *storingsgraad*, bij een geaccumuleerde gebruiksduur van (g) eenheden, is de intensiteit waarmee die onderdelen falen, die (g) gebruikseenheden hebben geaccumuleerd en die op dat moment *nog niet defect* waren.

Er wordt dus niet meer gesproken over de gehele oorspronkelijke populatie van onderdelen, maar slechts over die onderdelen die (g) gebruikseenheden hebben overleefd, dat wil zeggen een deel van de populatie dat steeds kleiner is naarmate (g) groter is.

VOOR EEN VOORBEELD KEREN WIJ TERUG NAAR DE OVERLEVINGSKARAKTERISTIEK VAN FIGUUR 1. IN DE VORIGE PARAGRAAF IS GESTELD DAT ER NA 50.000KM NOG $1.000 \times R(50.000M) = 368$ BANDEN ONGESTOORD ZIJN EN NA 60.000KM NOG MAAR 83 STUKS. DAT WIL ZEGGEN: DAT VAN DE BANDEN DIE BIJ 50.000 KM NOG ONGESTOORD WAREN ER $285/368 = 77,4\%$ ZULLEN FALEN ERGENS IN HET 10.000 KM LANGE INTERVAL TUSSEN 50.000 en 60.000 KM. DAT IS GEMIDDELD $77,4/10.000 = 0,00774\%$ PER KM OF 0,774 PER 10.000 KILOMETER.

Dit percentage van de bij 50.000 Km nog ‘levende’ banden dat gemiddeld over de komende 10.000 kilometer per kilometer gaat ‘sterven’ is een benadering van wat wordt genoemd de storingsgraad (*E:force of mortality, hazard rate*) en is berekend uit:

$$\frac{1.000 * \{R(50.000KM) - R(60.000KM)\}}{1.00 * R(50.000KM)} / (60.000 - 50.000KM)$$

of, omgewerkt, uit:

$$\frac{R(50.000\text{KM}) - R(60.000\text{KM})}{60.000\text{KM} - 50.000\text{KM}} / R(50.000\text{KM})$$

In de voorgaande paragraaf hebben wij de gemiddelde kansdichtheid voor het optreden van een storing tussen 50.000 en 60.000 kilometer aan een willekeurig gekozen band berekend, en hebben wij ook gezien, dat de waarde van de gemiddelde kansdichtheid nadert tot *de* waarde $f(50.000\text{KM})$ van de kansdichtheid in het punt 50.000 KM wanneer we de lengte van het interval dat volgt op 50.000 km laten krimpen in de richting van het punt 50.000 KM.

Op gelijke wijze nadert ook de waarde van het zojuist berekende percentage naar de waarde van *de* storingsgraad in het punt 50.000 KM.

Zo kunnen we nu de waarde van *de* storingsgraad (E: *instantaneous hazard rate*) in het punt 50.000 KM schrijven: $f(50.000) / R(50.000)$.

Deze grootheid wordt aangegeven met: $z(50.000\text{km})$.

Meer algemeen geldt voor de storingsgraadfunctie:

$$z(g) = \frac{f(g)}{R(g)}$$

In voorafgaande paragraaf wordt vermeld dat voor de overlevingskarakteristiek uit figuur 1 geldt: $f(50.000) = 0,368$ per 10.000 km.

Daaruit volgt dat:

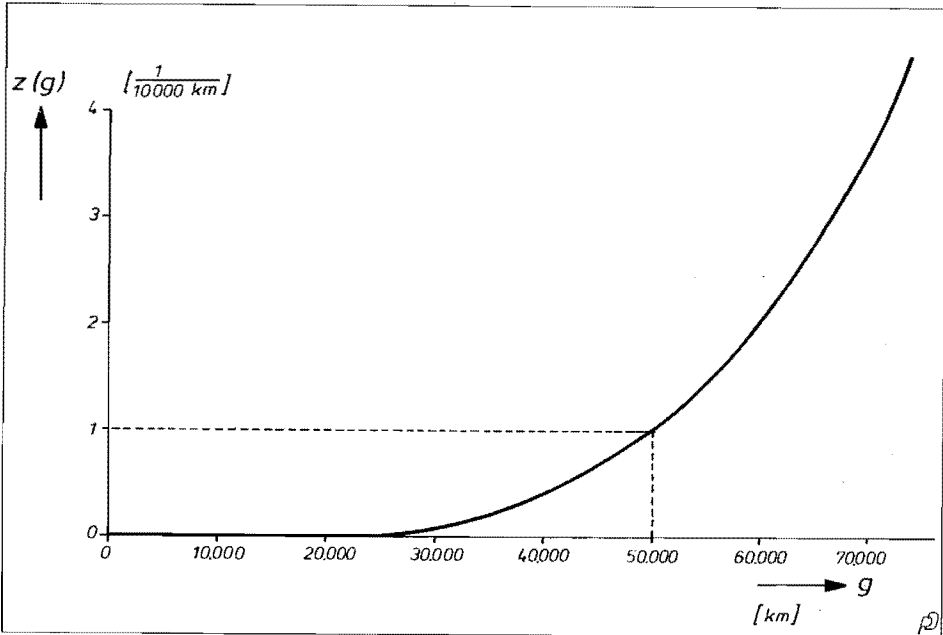
$$z(50.000) = \frac{f(50.000)}{R(50.000)} = \frac{(0,368/10.000)}{0,368} = 1,000 \text{ per } 10.000 \text{ KM,}$$

terwijl we voor de benaderde storingsgraad hadden gevonden de waarde 0,774 per 10.000 KM.

Figuur 4 toont de waarden van de storingsgraad, dat wil zeggen de storingsgraadfunctie, die behoren bij de overlevingskarakteristiek van figuur 1.

In de praktijk worden de begrippen *storingsgraad* en (*storings*) *kansdichtheid* vaak verward, en worden beiden vaak vagelijk geïdentificeerd met: *de kans op het optreden van een storing na een bepaald aantal geaccumuleerde gebruikseenheden*.

Dat dit niet correct is moge uit het bovenstaande en uit de figuren zijn gebleken.



Figuur 4. Storingsgraadwaarden (behorende bij figuur 1)

Inderdaad is de dimensie van de storingsgraad dezelfde als die van de (gemiddelde) kansdichtheid, namelijk:

$$\frac{\text{(dimensieloos getal)}}{\text{(dimensie van de gebruikseenheid)}}$$

maar toch is de betekenis van beide begrippen zeer verschillend. Dat wordt wellicht ten overvloede geïllustreerd door het volgende.

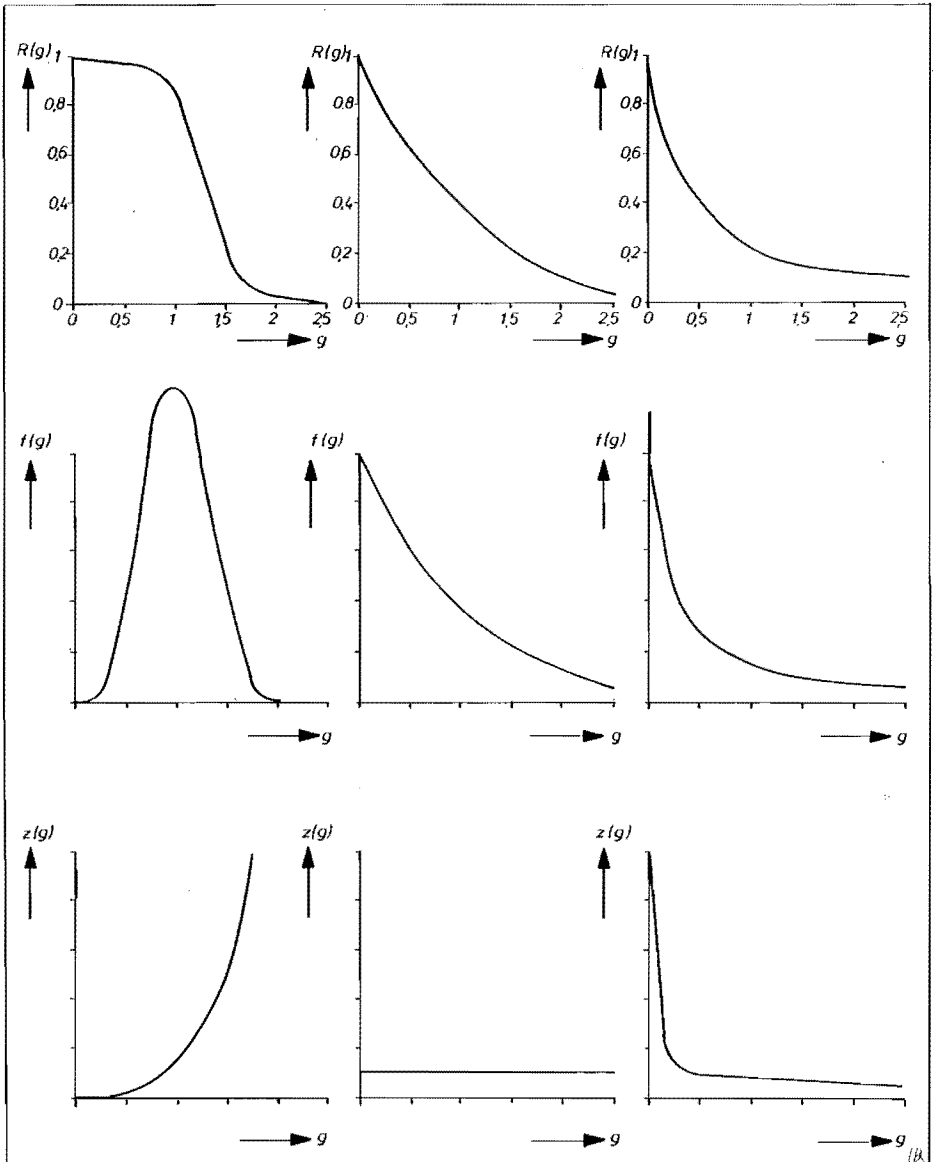
Bij het berekenen van de kansen op falen in een interval, en van de (gemiddelde) kansdichtheid over dat interval, kwam steeds de grootte van de gehele populatie, 10.000 stuks, in de noemer voor. De som van de kansen op falen over alle intervallen van 0 tot g_1 , g_1 tot g_2 , g_2 tot g_3 , enzovoort bedraagt dan ook altijd 1. Bij het berekenen van de (benaderde) storingsgraad echter komt er in de noemer een getal voor, namelijk $1.000 \times R(g)$, dat kleiner is naarmate g groter is. De numerieke waarde van de storingsgraad is dan ook bijna altijd groter dan de numerieke waarde van de kansdichtheid, mits beide in dezelfde eenheid worden uitgedrukt. Alleen in het punt $g = 0$ is de numerieke waarde van de (benaderde) storingsgraad gelijk aan die van de gemiddelde kansdichtheid.

Uit figuur 4 blijkt dat voor de overlevingskarakteristiek van figuur 1 de storings-

graad toeneemt naarmate het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden toeneemt.

We spreken hier van een *toenemende* storingsgraad (IFR) (E: *Increasing Failure Rate*).

Er bestaan ook overlevingskarakteristieken waarvoor de storingsgraad *constant* (CFR) (E: *Constant Failure Rate*) is, ongeacht het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden, en karakteristieken waarvoor de storingsgraad *afneemt*



Figuur 5. Overlevingskarakteristiek, kansdichtheid en storingsgraad bij IFR, CFR en DFR

(DFR) (E:*Decreasing Failure Rate*) als het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden toeneemt.

Figuur 5 toont van ieder van de drie gevallen een voorbeeld, bestaande uit de bij elkaar behorende overlevingskarakteristiek, de kansdichtheid en de storingsgraad.

Voordat we iets zeggen over het voorkomen in de praktijk van de drie vormen van de storingsgraadsfunctie vestigen wij de aandacht op belangrijke conclusies die kunnen worden getrokken uit de vorm van de storingsgraadsfunctie, mits die bekend is.

- Stel dat we een onderdeel hebben dat uit een populatie van nieuwe onderdelen komt, waarvan de overlevingskarakteristiek een toenemende storingsgraad (IFR) vertoont. Kan het dan effectief zijn zo een onderdeel, nadat het een aantal gebruikseenheden heeft gefunctioneerd en nog niet is gestoord, *preventief* te vervangen door een nieuw onderdeel uit de populatie ?

Welzeker; want het toenemen van de storingsgraad met het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden leert ons, dat een nieuw onderdeel een lagere storingsgraad zal vertonen dan een oud onderdeel, ook al is dit laatste nog niet defect.

Of zo een verving economisch verantwoord (efficiënt) is, is een andere vraag, waarop hier niet wordt ingegaan.

- Een geheel andere conclusie moeten wij trekken in het geval dat de overlevingskarakteristiek van de populatie onderdelen, een constante storingsgraad(CFR) vertoont.

Want zelfs als er niets fout gaat bij de vervanging van een onderdeel, dan nog is het beste dat we kunnen bereiken door een oud, maar nog functionerend, onderdeel te vervangen door een nieuw: dezelfde storingsgraad als die het oude onderdeel op het moment van vervangen al had. De storingsgraad in dit geval is immers constant en onafhankelijk van het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden. Het is dus niet effectief om een functionerend onderdeel door een nieuw te vervangen als de populatie onderdelen een overlevingskarakteristiek heeft met een constante storingsgraad (CFR).

De conclusie in het geval dat de overlevingskarakteristiek afnemend (DFR) is, is nu vanzelfsprekend.

- Het moet ook duidelijk zijn dat het, vanuit het gezichtspunt van het onderhoud, alleen zin heeft te spreken over *de* waarde van de storingsgraad, in het geval dat die constant is, en dus voor alle waarden van de geaccumuleerde en overleefde gebruiksduur inderdaad gelijk aan *de* waarde.

In alle andere gevallen kan *de* waarde van de storingsgraad hoogstens worden geïnterpreteerd als een gemiddelde over een, meestal niet vermelde, bepaalde

tijdsduur. Maar dan nog verdoezelt dit slordige spraakgebruik de uit onderhoudsstandpunt belangrijkste eigenschap van de storingsgraadsfunctie, namelijk zijn afhankelijkheid van het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden.

- De gevolgtrekkingen die kunnen worden gedaan op grond van de vorm van de storingsgraad als functie van het aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden spelen een belangrijke rol bij het ontwerpen van het onderhoudsconcept.
- In de praktijk komen in het algemeen IFR en CFR het meeste voor. Slechts in de electronica constateert men wel eens DFR's.

Men moet in de praktijk echter op zijn hoede zijn voor twee bijzondere verschijnselen:

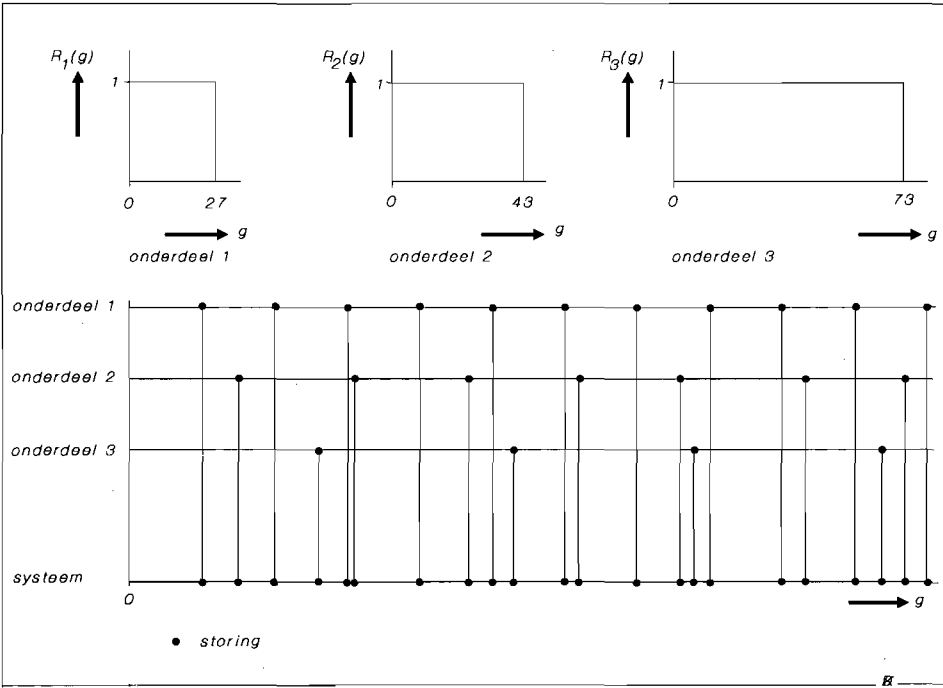
Het *eerste verschijnsel* doet zich niet zelden voor bij een samengesteld (sub)systeem. Als men geen onderscheid maakt tussen de specifieke storingen (onderscheid naar onderdeel en daarbinnen naar oorzaak) maar storingen niet nader identificeert, dan krijgt men het verschijnsel waarvan het principe geïllustreerd is in figuur 6, en dat met *superpositie* wordt aangeduid.

In figuur 6 is een systeem verbeeld dat eenvoudigheidshalve uit drie onderdelen bestaat. Ieder onderdeel heeft zijn eigen overlevingskarakteristiek, die boven in de figuur is aangegeven.

Een onderdeel dat defect raakt doet het hele systeem defect raken. Als een onderdeel defect raakt wordt het door een nieuw vervangen; gedurende de vervangingstijd staat de gebruikseenhedenteller stil.

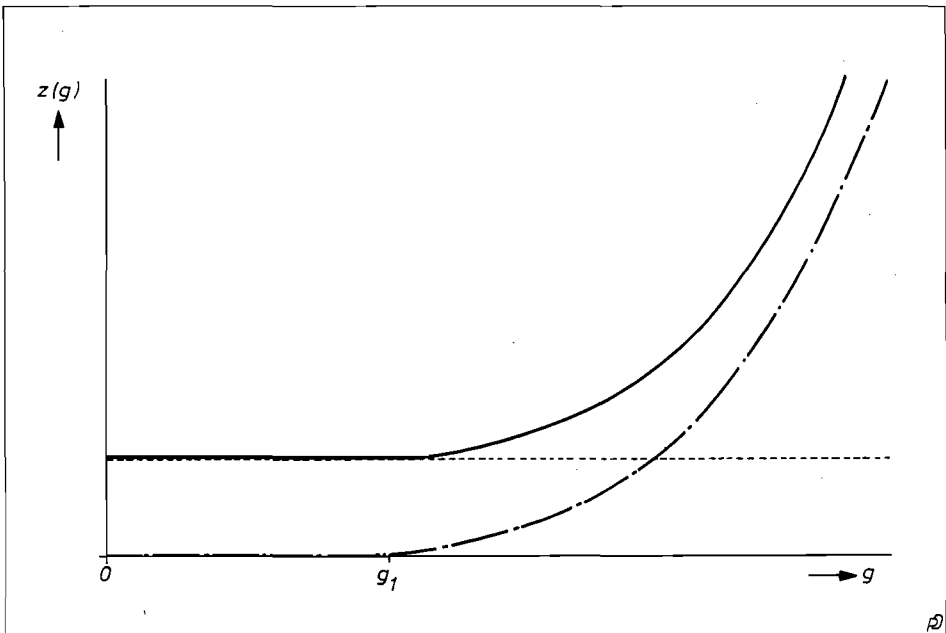
Als men nu alle onderdeel-storingen, ongeacht het onderdeel, interpreteert als systeem-storingen, en men maakt de ondoordachte veronderstelling dat de aantallen gebruikseenheden die verstrijken tussen twee opeenvolgende systeemstoringen waarnemingen zijn van *levensduren* van het systeem, dan blijkt vaak dat de overlevingskarakteristiek, die men uit deze levensduren kan construeren, sterk lijkt op een levensduurkarakteristiek met een CFR, vooral als het aantal samenstellende onderdelen groot is. Dat zou leiden tot de conclusie dat het niet effectief kan zijn om preventieve onderhoudsacties op het systeem uit te voeren. Een onterechte conclusie, zoals al is opgemerkt.

Dit is een van de redenen waarom men in de onderhoudstheorie onderscheid maakt tussen TBF (E: *time between failures*) van een systeem en TTF (E: *time to failure*) van een onderdeel, waarbij in beide gevallen voor *time* moet worden gelezen: gebruiksduur, gemeten in gebruikseenheden.



Figuur 6. Superpositie bij een samengesteld (sub)systeem

(Merk op dat in dit overdreven geidealiseerde geval ieder onderdeel apart een uitstekende kandidaat zou zijn – uit effectiviteits overwegingen, wellicht niet uit efficicyoverwegingen – voor geplande preventieve vervanging tegen het einde van zijn leven)



Figuur 7. Gecombineerde storingsgraad

Het *tweede verschijnsel* waarvoor men in de praktijk op zijn hoede moet zijn, is dat zelfs een enkelvoudig onderdeel aan verschillende storingsprocessen onderworpen kan zijn, zodat het onderdeel door storingen van verschillende aard kan worden geveld.

Een deel van de storingen van de verschillende exemplaren van dat onderdeel heeft niets met slijtage te maken maar heeft zogenaamde *externe* oorzaken, zoals ongelukken of foutieve bediening.

De overlevingskarakteristiek van die deelpopulatie blijkt meestal een CFR te hebben. Het andere deel van de populatie, dat niet door externe oorzaken wordt gestoord kan dan bijvoorbeeld een overlevingskarakteristiek hebben die door een IFR wordt ge kenmerkt. De gecombineerde storingsgraad van de totale populatie kan er dan uitzien als geschetst in figuur 7.

Een triviaal voorbeeld van zo een situatie is een autoband, die niet alleen door slijtage aan het eind van zijn levensduur kan komen maar ook tengevolge van het rijden over toevallig op de weg terecht gekomen scherpe voorwerpen.

In de praktijk komen gecombineerde storingsgraadsfuncties niet zelden voor, bijvoorbeeld wanneer een onderdeel kan bezwijken tengevolge van bedieningsfouten (dat wil zeggen: externe oorzaken) of – als het niet al geveld is door een bedieningsfout – tengevolge van normale slijtage.

In zo een situatie (zie figuur 7) moet de conclusie luiden dat het niet effectief is een nog functionerend onderdeel preventief te vervangen door een nieuw, mits dat onderdeel bijvoorbeeld nog geen g_1 gebruikseenheden heeft geaccumuleerd. Als het echter meer dan g_1 eenheden oud is en nog functioneert dan is het wel effectief om zo een onderdeel preventief te vervangen.

Nogmaals, of preventieve vervanging, zelfs dan economisch verantwoord (efficiënt) zou zijn, is een andere vraag.

Men moet voor dit tweede verschijnsel vooral op zijn hoede zijn als de TTF- (*E: time to failure*)gegevens, waaruit de overlevingskarakteristiek wordt geschat, zich niet uitstrekken voorbij een bepaald aantal gebruikseenheden. Dit kan zich bijvoorbeeld voordoen doordat er een preventieve vervangingsleeftijd voor het onderdeel van kracht is geweest gedurende de tijd waarover de TTF-gegevens zijn verzameld.

Het is dus bij het gebruik van overlevingskarakteristieken als hulpmiddel bij de bepaling van het onderhoudsconcept, van belang om zich af te vragen of er op de gebruikseenheden TTF's of TBF's staan, en ook bij TTF's onderscheid te maken tussen storingen van verschillende aard die mogelijk het einde van de gebruiksduur van een onderdeel kunnen hebben veroorzaakt.

2. Betrouwbaarheidsmodellen

– Inleiding

In het voorgaande is uiteengezet wat *storingsgraadfunctie* is. Gebleken is dat kennis van de vorm van die functie onontbeerlijk is om in de praktijk de effectiviteit te kunnen voorspellen van preventief onderhoud, indien dat onderhoud wordt uitgevoerd op basis van een vast aantal geaccumuleerde en overleefde gebruikseenheden.

Ook is duidelijk geworden dat er – zelfs wanneer het een ondeelbaar onderdeel betreft – een onderscheid moet worden gemaakt tussen de verschillende mogelijke storingen, om te kunnen komen tot juiste uitspraken over de effectiviteit van dat zogeheten *gebruiksduurafhankelijk onderhoud*.

Volgens de definitie is betrouwbaarheid: de kans dat functioneren sinds nieuw, zonder storing, tenminste een bepaalde gebruiksduur zal voortduren. Hoe groter het aantal geaccumuleerde gebruikseenheden g , hoe kleiner de kans op overleven, R , de betrouwbaarheid (E: *Reliability*).

Daarom werd in voorgaande paragrafen: $R(g)$ geschreven voor de betrouwbaarheidsfunctie en werd er van uitgegaan dat: $R(0) = 1$ en $R(\infty) = 0$.

Soms wordt er gewerkt met het complement van de betrouwbaarheid, $F(g) = 1 - R(g)$.

Hierbij wordt $F(g)$ de kansverdelingsfunctie van de levensduur genoemd, of kortweg ‘de levensduurverdeling’, en kan worden geïnterpreteerd als de kans dat er een storing vóór of op de leeftijd g zal optreden.

In theorie kan dus ieder wiskundige functie die aan de voorwaarden: $F(0) = 0$, $F(\infty) = 1$ voldoet, en die voor toenemende waarden van g toenemende waarden van $F(g)$ geeft, dienen als modelbeschrijving van de levensduurverdeling.

Er zijn dan ook een aantal verschillende functies voorgesteld voor het beschrijven van de betrouwbaarheid. Eén daarvan is verreweg de belangrijkste geworden, de zogenaamde ‘Weibull – verdeling’.

Er zijn verschillende redenen waarom die verdeling zo een belangrijke plaats inneemt. De zwaarste daarvan is het feit dat deze zó flexibel is dat ze vrijwel alle, in de praktijk voorkomende, verbanden tussen betrouwbaarheid en geaccumuleerde gebruiksduur kan beschrijven.

Wij zullen ons daarom in dit hoofdstuk beperken tot de Weibull verdeling in zijn verschillende gedaanten. Wie details over andere verdelingen nodig mocht hebben verwijzen wij naar Nelson³.

– De Weibull verdeling

De wiskundige uitdrukking van de *Weibull overlevingskarakteristiek* luidt:

$$R_w(g) = e^{-\frac{(g-\gamma)^\beta}{\alpha}} \quad \text{voor waarden van } g \geq \gamma$$

$$R_w(g) = 1 \quad \text{voor waarden } 0 \leq g < \gamma$$

(Opmerking: Wij hebben nu het subscript (w) toegevoegd om duidelijk te maken dat wij het over de Weibull-verdeling hebben.)

Hierin stelt het getal e ($\approx 2,71828$) de basis van de natuurlijke logaritmen voor en g het aantal geaccumuleerde gebruiks eenheden sinds nieuw.

De Griekse letters (α , β en γ) zijn de zogenaamde parameters van de verdeling: De letter γ stelt het zogenaamde ‘safe life’ voor een leeftijd waarvóór zich geen storingen kunnen voordoen (zoals blijkt uit het feit dat $R_w(g) = 1$ voor $0 \leq g < \gamma$)

α wordt de schaalparameter genoemd (soms ook wel de karakteristieke leeftijd) en

de letter β is de vormparameter.

Om geen wiskundige – en praktische – onzin uit de formule voor $R_w(g)$ te krijgen mogen we uitsluitend positieve waarden voor α en β gebruiken, en vanzelfsprekend moet $\gamma \geq 0$.

Uit de definitie van $R_w(g)$ volgt: dat $R_w(g) = 1$, voor waarden van g tussen 0 en γ .

Uit de formule van $R_w(g)$ volgt verder dat voor $g = \gamma$:

$$R_w(\gamma) = e^{-0} = 1.$$

Ook zien we, dat naarmate g groter wordt, de term $\frac{(g-\gamma)^\beta}{\alpha}$

groter wordt en dus $R_w(g) = e^{-\frac{(g-\gamma)^\beta}{\alpha}}$ kleiner; als g naar oneindig gaat, gaat $R_w(g)$ naar nul. De functie $R(g)$ kan dus inderdaad een overlevingskarakteristiek beschrijven.

Afhankelijk van de waarden van de parameters kan de Weibull verdeling verschillende gedaanten aannemen. Deze verschillen komen het best tot uitdrukking in de reeds eerder geïntroduceerde kansdichtheidsfunctie $f(g)$.

Een *kansdichtheidsfunctie* wordt gedefinieerd als:

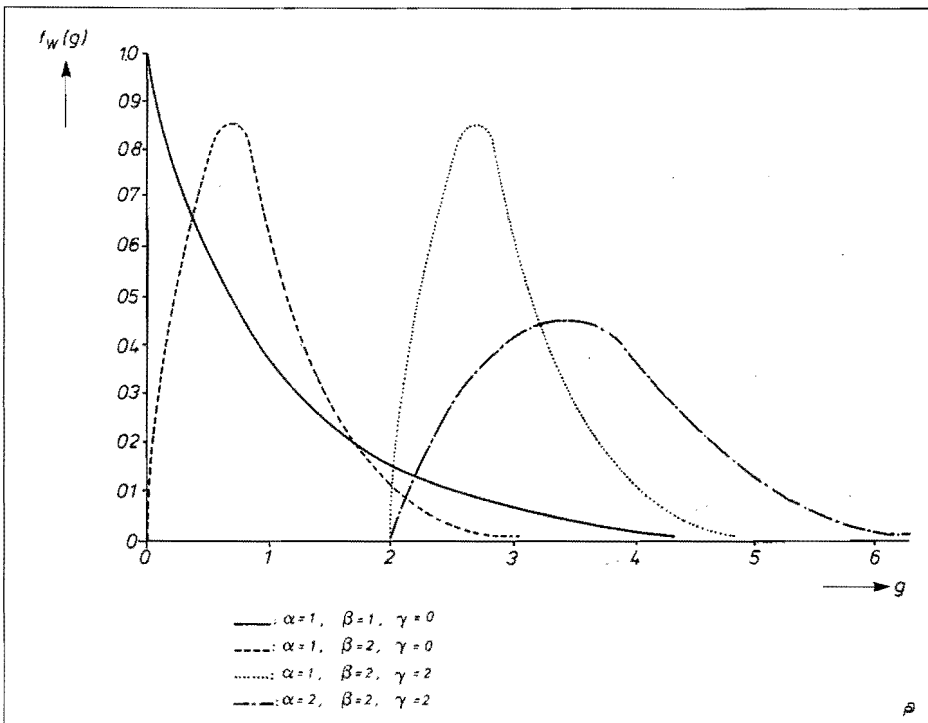
$$f(g) = \frac{dF(g)}{dg} = -\frac{dR(g)}{dg}$$

Voor de Weibull verdeling geldt derhalve:

$$f_w(g) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{g-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{g-\gamma}{\alpha}\right)^\beta}, \quad g \geq \gamma$$

$$f_w(g) = 0, \quad 0 \leq g < \gamma$$

Figuur 8 toont enige gedaanten van $f(g)$ voor verschillende combinaties van waarden van de parameters α , β en γ .



Figuur 8. Kansdichtheidsfunctie

Ook andere eigenschappen van de Weibull verdeling worden beïnvloed door de waarden van α , β en γ ; de belangrijkste daarvan is wel de reeds eerder geïntroduceerde storingsgraadsfunctie: $z(g)$.

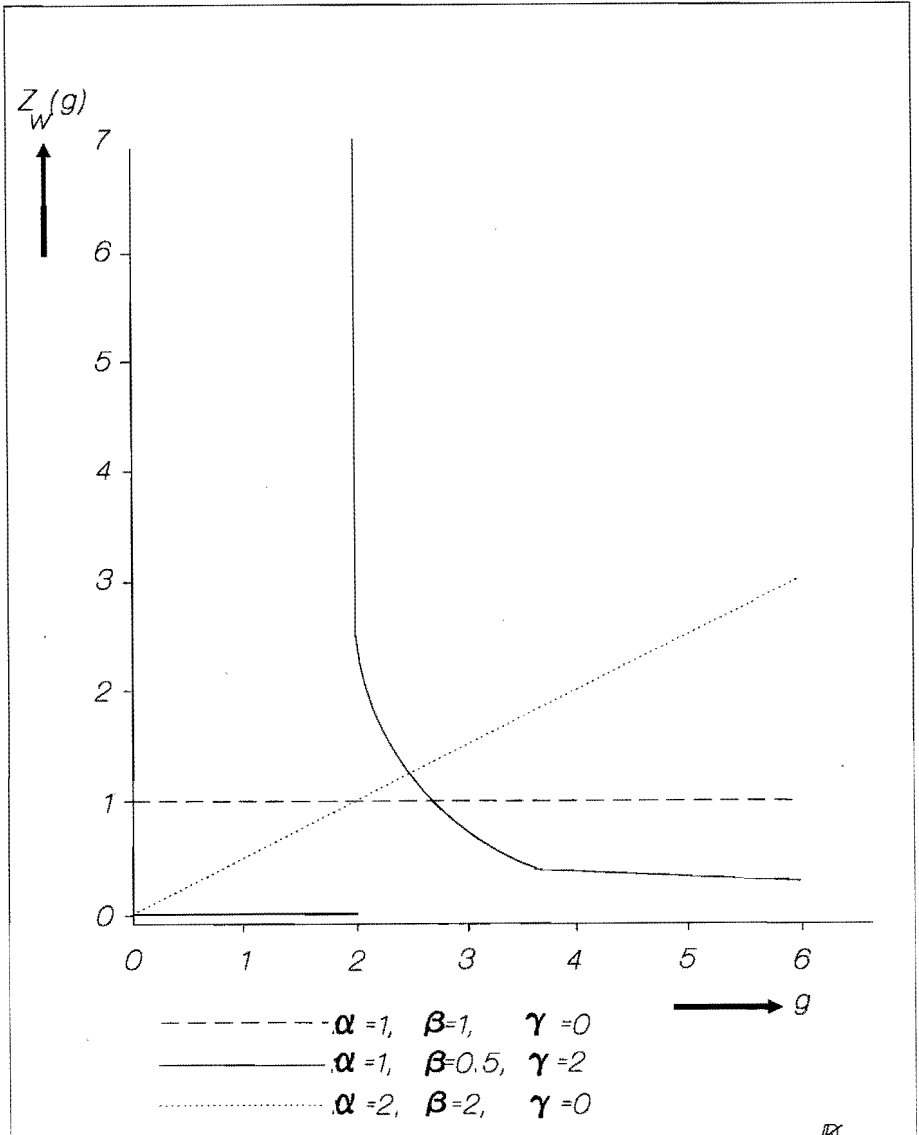
De storingsgraadsfunctie is gedefinieerd als: $z(g) = f(g)/R(g)$.

Voor de storingsgraadsfunctie van de Weibull verdeling geldt in het bijzonder:

$$z_w(g) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{g-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad g \geq \gamma$$

$$z_w(g) = 0, \quad 0 \leq g < \gamma$$

Figuur 9 toont enige Weibull storingsgraadsfuncties.



Figuur 9. Storingsgraadsfunctie

Merk op dat voor waarden van $\beta > 1$, de storingsgraadsfunctie $z_w(g)$ steeds toeneemt als g , het aantal geaccumuleerde gebruikseenheden, toeneemt.

Bijvoorbeeld voor $\beta = 2$ is $z(g) = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{g-\gamma}{\alpha} \right)$ (zie figuur 9).

Voor $\beta = 1$ wordt $z_w(g) = \frac{1}{\alpha}$, geheel onafhankelijk van het aantal geaccumuleerde eenheden gebruiksduur. En voor waarden van $\beta < 1$ neemt $z_w(g)$ af als g toeneemt, althans als het aantal geaccumuleerde gebruikseenheden g eenmaal groter is dan γ .

Bijvoorbeeld:

voor $\beta = 1/2$ wordt $z_w(g) = \frac{1}{2\alpha} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{g-\gamma}{\alpha} \right)}}$ (zie figuur 9).

We zien hier, voor waarden van $\beta < 1$ en $\gamma > 0$, een verschijnsel dat zowel uit theoretisch als uit praktisch oogpunt enigszins verwonderlijk is: een storingsgraadsfunctie die de waarde nul heeft voor geaccumuleerde levensduren tussen 0 en γ , maar die bij een levensduur van $g = \gamma$ naar 'oneindig' springt, om vervolgens bij nóg grotere waarden van g steeds kleiner te worden.

In biologische toepassingen zou men een waarde van $\gamma > 0$ als een 'incubatieperiode' kunnen interpreteren, maar of iets dergelijks bij machineonderdelen ook opgaat lijkt twijfelachtig.

Een meteen vanaf het begin van de levensduur afnemende storingsgraad, dus $\beta < 1$ en $\gamma = 0$, is op zich niet onrealistisch; men zegt dat bijvoorbeeld soldeerverbindingen een dalende storingsgraad vertonen. Om bovengenoemde reden en nog andere stelt men vaak $\gamma = 0$ en vereenvoudigt de formules voor $R_w(g)$, $f_w(g)$ en $z_w(g)$ dienovereenkomstig. We zullen dit gebruik volgen, hoewel we verderop (onder Grafische methoden) weer op het gebruik van waarden van $\gamma > 0$ terugkomen.

We hebben nu de grote *flexibiliteit* van de Weibull verdeling gedemonstreerd. Een van de redenen waarom deze in de betrouwbaarheidstheorie en -praktijk zo geliefd is!

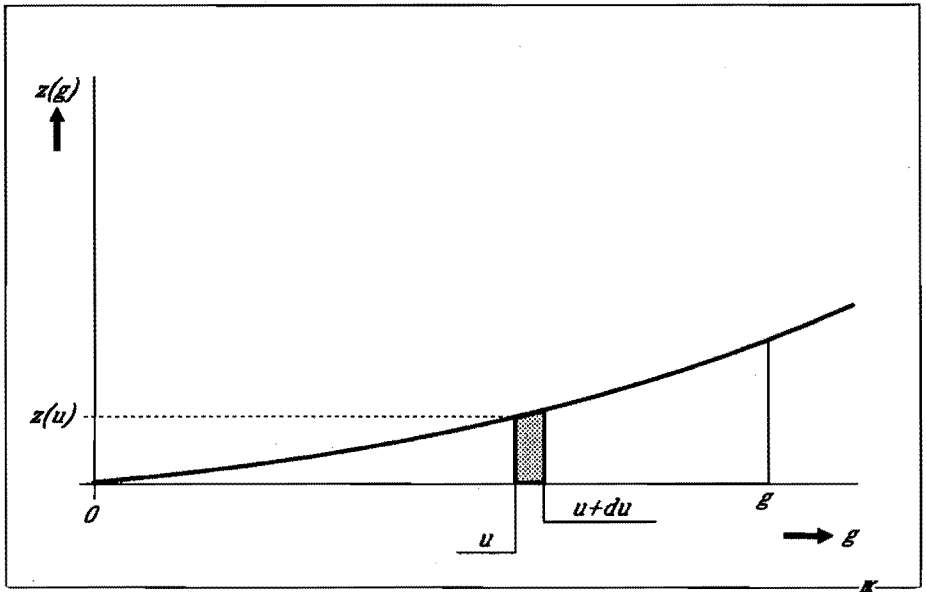
Immers door voor β verschillende waarden te kiezen kunnen we ervoor zorgen dat de storingsgraadsfunctie bij toenemende waarden van de gebruiksduur toeneemt, afneemt of constant blijft. Zo kunnen we de Weibull verdeling gebruiken voor de beschrijving van ieder van de drie belangrijke typen levensduurkansverdelingen, IFR, DFR en CFR, door eenvoudigweg de waarde van één parameter te veranderen.

Wij zullen thans een eigenschap van de storingsgraadsfunctie illustreren die we verderop in Grafische methoden zullen gebruiken, en die niet alleen voor de Weibull verdeling geldt maar voor alle mogelijke levensduurverdelingen.

We hebben gezien dat voor de Weibull-verdeling (in zijn vereenvoudigde vorm met $\gamma = 0$) geldt:

$$R_w(g) = e^{-\left(\frac{g}{\alpha}\right)^\beta} \quad \text{en } z_w(g) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{g}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Als we nu het oppervlak onder de curve $z_w(g)$ bepalen, van $g=0$ tot $g=g$ (zie figuur 10), dat wil zeggen als we $z_w(u)$ integreren tussen 0 en g , dan vinden we voor dit oppervlak:



Figuur 10.

$$H_w(g) = \int_0^g z_w(u) du = \int_0^g \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta-1} du = \int_0^g \beta \left(\frac{u}{\alpha}\right)^{\beta-1} d\frac{u}{\alpha} = \left(\frac{g}{\alpha}\right)^\beta$$

Aangezien de dimensie van de storingsgraaddimensie van de gebruikseenheid $^{-1}$ is, is het oppervlak $H(g)$ in dimensieloze eenheden.

De formules voor $R_w(g)$ en $H_w(g)$ vergelijkend, zien we dat voor de Weibull verdeling geldt:

$$R_w(g) = e^{-\left(\frac{g}{\alpha}\right)^\beta} = e^{-\int_0^g z_w(u) du} = e^{-H_w(g)}$$

De betrekking $R(g) = e^{-\int_0^g z(u) du}$ blijkt *algemeen geldig* te zijn, ook voor

alle andere wiskundige vormen die we kunnen bedenken voor de overlevingskarakteristiek en de daarbij behorende vorm van de storingsgraadsfunctie.

De functie $H(g) = \int_0^g z(u)du$ wordt meestal de *cumulatieve storingsgraadsfunctie* genoemd.

Uit het feit dat voor de Weibull-verdeling geldt $H_w(g) = (\frac{g}{\alpha})^\beta$

volgt: $\ln H_w(g) = \beta \ln g - \beta \ln \alpha$, of anders geschreven:

$$\ln g = \frac{1}{\beta} \ln H_w(g) + \ln \alpha$$

Op dubbel logaritmisch grafiekenpapier (dat wil zeggen: papier waarop langs de ene as in logaritmische schaal $\ln g$, en langs de andere as in logaritmische schaal $\ln H(g)$ kan worden uitgezet, (zie figuur 11) resulteert deze vergelijking in een rechte lijn.

Het omgekeerde van dit verschijnsel kan ook worden bewezen: alleen als het uitzetten van g tegen $H(g)$ op dubbel logaritmisch papier in een rechte lijn resulteert, dan hebben we te doen met een Weibull overlevingskarakteristiek.

De tangens van de hellingshoek ϑ van deze rechte is:

$$\frac{d \ln g}{d \ln H_w(g)} = \frac{1}{\beta}$$

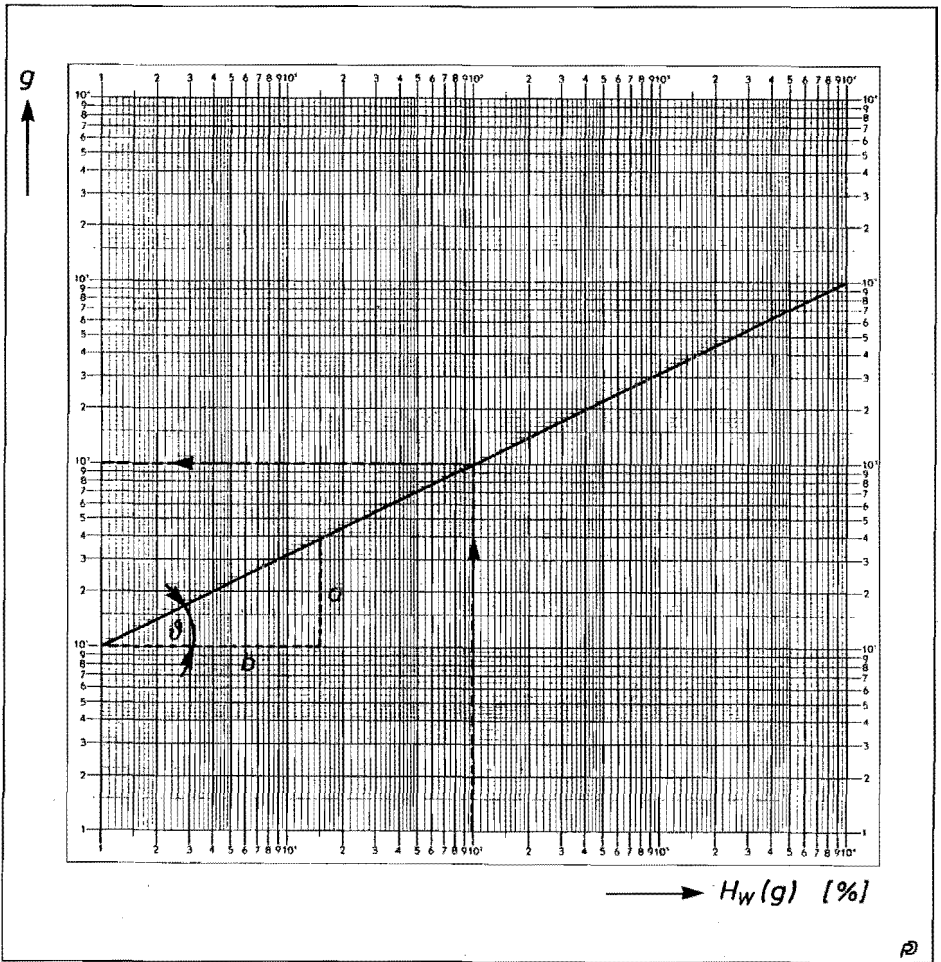
Bovendien geldt voor $H_w(g) = 1$ (dat wil zeggen $\ln H_w(g) = 0$) dat $\ln g = \ln \alpha$, dus $\alpha = g$ voor $H(g) = 1$.

Zo zien wij in figuur 11 dat $\beta = 1/\text{tg } \vartheta = \gamma/a = 2$, en $\alpha = 100$.

De hier afgeleide theoretische eigenschappen van de cumulatieve storingsgraadsfunctie $H_w(g)$ zullen bij de Grafische methoden (zie hoofdstuk 3) van eminent belang blijken te zijn bij het schatten van de overlevingskarakteristiek uit een aantal waargenomen levensduren oftewel TTF's (E: Times to Failure).

De overlevingskarakteristiek bevat alle informatie over de betrouwbaarheid van een (sub)systeem of onderdeel. We hebben al twee afgeleide grootheden besproken: de kansdichtheid voor het optreden van een storing op een willekeurig punt in de gebruiksduur, en de storingsgraad. Hier behandelen we nog enige grootheden die de betrouwbaarheid eenvoudig (maar slechts ten dele) samenvatten. Het zijn maten voor de ligging van de centrale waarde van de levensduren en voor de spreiding van de levensduren rondom die centrale waarde.

De *verwachte waarde* van de levensduren die beschreven worden door de overlevingskarakteristiek is, in termen van mechanica, de ligging ten opzichte van de as $g = 0$ van het zwaartepunt van de 'kansmassa', waarvan de verdeling over de



Figuur 11.

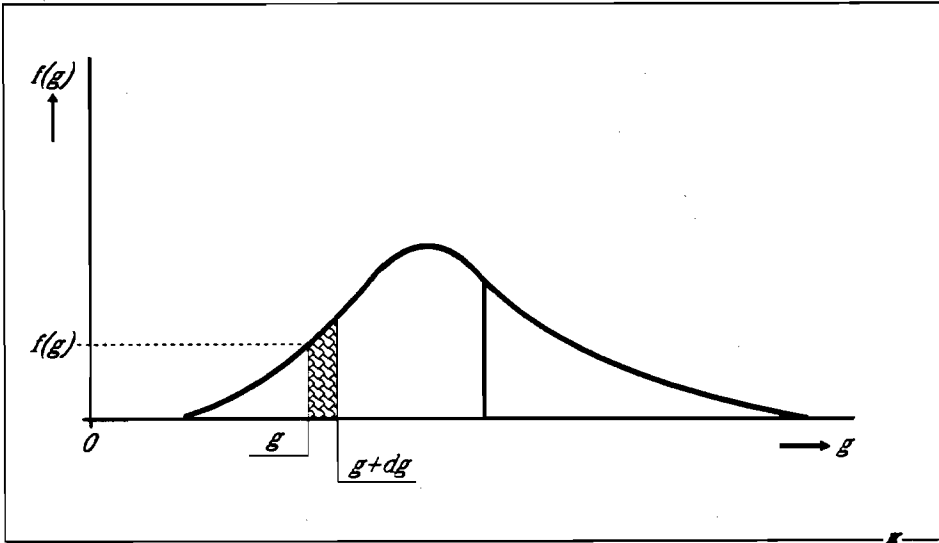
g -as beschreven wordt door de kansdichtheidsfunctie $f(g)$ (zie figuur 12). Als symbool voor de verwachte waarde gebruikt men vaak de Griekse letter μ .

Als dg naar nul nadert, nadert de kansmassa die tussen g en $g + dg$ ligt naar $f(g)dg$ (zie figuur 12). De afstand van het zwaartepunt van de massa tot $g = 0$ nadert dan tot g .

$$\text{De totale kansmassa is } \int_0^{\infty} f(g)dg = F(\infty) = 1 - R(\infty) = 1$$

Dus het zwaartepunt van de totale kansmassa ten opzichte van de as $g = 0$

$$\text{bedraagt } \mu = \int_0^{\infty} gf(g)dg.$$



Figuur 12.

Uit de berekening volgt dat de dimensie van μ (gebruikseenheden) is.

De *variantie* is – weer in termen van de mechanica – het massatraagheidsmoment t.o.v. de as $g = \mu$ van de kansmassa. De variantie is dus een maat voor de spreiding van de kansmassa rondom de lijn $g = \mu$. Een variantie van 0 geeft aan dat alle massa in de lijn $g = \mu$ geconcentreerd is. Voor de variantie gebruikt men vaak het symbool σ^2 . De variantie wordt meestal berekend, zoals in de mechanica, door het massatraagheidsmoment van de kansmassaverdeling ten opzichte van de as $g = 0$ te berekenen en daarvan vervolgens af te trekken het kwadraat van het massatraagheidsmoment van het zwaartepunt van de kansmassa ten opzichte van de as $g = 0$.

Aldus is, aangezien de totale kansmassa gelijk is aan 1, de variantie:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} g^2 f(g) dg - \mu^2$$

Uit de berekening blijkt dat de dimensie van σ^2 [gebruiksdureenheden²] is. De wortel uit de variantie, dus σ , wordt vaak de *standaardafwijking* genoemd. Hij heeft dezelfde dimensie als μ , te weten [gebruikseenheden].

De zogenaamde *coëfficiënt van variatie* of *variatiecoëfficiënt* CV (let wel: variatie zonder n) is gedefinieerd als $CV = \sigma/\mu$.

Het is een dimensieloze grootheid die een maat is voor de relatieve spreiding van de kansmassa ten opzichte van zijn verwachte waarde. Een waarde van $CV = 0$ betekent, dat alle kansmassa geconcentreerd is in het punt $g = \mu$.

Waarden van CV tussen 0 en 1 betekenen over het algemeen dat de storingskansdichtheidsfunctie een (min of meer scheve) klokvorm heeft en dat de storingsgraad als functie van de gebruiksduur toeneemt. Waarden groter dan, of gelijk aan 1 betekenen meestal dat de dichtheidsfunctie extreem scheef is, en dat de storingsgraad een niet toenemende functie van de gebruiksduur is.

De gebruikelijke formules voor μ en σ^2 leiden in het geval van de Weibull verdeling tot ingewikkelde uitdrukkingen. In plaats daarvan zullen we voor de Weibull verdeling slechts numerieke waarden van μ en σ^2 geven.

Dit wordt vergemakkelijkt door het feit dat voor de Weibull verdeling geldt:

$$\mu_w = \gamma + \alpha \times (\text{factor 1}) \text{ en}$$

$$\sigma_w = \alpha \times (\text{factor 2})$$

waarin factor 1 en factor 2 gecompliceerde functies van β zijn

Tabel 1 geeft numerieke waarden voor die factoren, alsmede voor (factor 2) / (factor 1), welke waarde gelijk is aan de waarde van de variatiecoëfficiënt σ_w / μ_w , voor die gevallen waarin $\gamma = 0$.

Tabel 1. Factoren ter berekening van μ en σ van een Weibull verdeling $\mu_w = \gamma \alpha \cdot \text{factor}$, $\sigma = \alpha \cdot \text{factor 2}$

β	Factor 1	Factor 2	Factor 2 / Factor 1
,25	24	199,36	8,31
,50	2	4,47	2,24
,75	1,19	1,61	1,35
1	1	1	1
1,5	0,90	0,61	0,68
2	0,89	0,46	0,52
4	0,90	0,25	0,28
8	0,94	0,14	0,15
16	0,97	0,08	0,08
50	0,989	0,025	0,025
100	0,994	0,013	0,013

Bij wijze van voorbeeld zullen we de variatiecoëfficiënt uitrekenen van de kansverdelingen waarvan de kansdichtheidsfuncties in figuur 1 zijn geschetst (zie tabel 2).

Tabel 2. Berekening van variatiecoëfficiënt.

parameterwaarden						
α	β	γ	μw	σw	$CV = \sigma w / \mu w$	
(1) 1	1	0	$0 + 1 \times 1 = 1$	$1 \times 1 = 1$	1	
(2) 1	2	0	$0 + 1 \times 0,89 = 0,89$	$1 \times 0,46 = 0,46$	0,52	
(3) 1	2	2	$2 + 1 \times 4,89 = 2,89$	$1 \times 0,46 = 0,46$	0,16	
(4) 2	2	2	$2 + 2 \times 0,89 = 3,78$	$2 \times 0,46 = 0,92$	0,24	

3. Grafische methoden

– Inleiding

In voorgaande hoofdstukken hebben wij onder andere gewezen op het belang van het kennen van de overlevingskarakteristiek en in het bijzonder van de storingsgraadsfunctie; in hoofdstuk 2 hebben wij het belangrijkste theoretische model besproken dat gebruikt wordt voor het beschrijven van overlevingskarakteristieken. In dit hoofdstuk zullen we zien hoe wij een *schatting* van de overlevingskarakteristiek kunnen verkrijgen uit in de praktijk geobserveerde levensduren oftewel TTF's (E: Times to Failure). Zo een schatting van de overlevingskarakteristiek geeft dan meteen informatie over de vorm van de storingsgraadsfunctie, die zo een belangrijke rol speelt bij het bepalen van het onderhoudsconcept.

De hier te beschrijven grafische methode, 'hazard plotting', is ontwikkeld door W. Nelson. Deze Nelson methode heeft het grote voordeel boven andere methoden dat hij eenvoudig is en tevens gebruik kan maken van waarnemingen van levensduren die nog niet voltooid zijn, zogenaamde 'gecensureerde waarnemingen', waar wij in de praktijk veelvuldig mee te maken hebben.

Alvorens wij de methoden zelf uiteenzetten, zullen wij eerst iets zeggen over de herkomst en de aard van de gegevens waarvan de methode gebruik maakt. Wij besluiten met het bespreken van enkele complicaties die zich in de praktijk soms voordoen en een puntsgewijze samenvatting.

Wij beperken ons weer tot het bespreken van het schatten van de Weibull overlevingskarakteristiek en zijn afgeleide grootheden. De Weibull karakteristiek is verreweg de meest toegepaste in het onderhoud.

Voor de (zeldzame gevallen) waarin de Weibull karakteristiek de waarnemingen toch niet goed blijkt te kunnen beschrijven, verwijzen wij naar het artikel van Nelson (1969)² en zijn latere boek, Nelson (1982)³.

– *De gegevens*

De gegevens die wij ter beschikking hebben voor het schatten van een overlevingskarakteristiek komen in de praktijk meestal uit het onderhouds-archief (werkbonden, machinelogboeken) en zijn zelden verkregen uit statistisch meer of minder verantwoord opgezette en uitgevoerde levensduurexperimenten. Daarom moeten ze een voorbereiding ondergaan om hun geschiktheid te onderzoeken voor het schatten van een overlevingskarakteristiek.

Wij mogen ons veelal gelukkig prijzen als wij gegevens hebben over de *levensduren*, in chronologische volgorde, van de verschillende exemplaren van een onderdeel die in een bepaalde machine gefunctioneerd hebben totdat zij werden vervangen of gerepareerd. Ook de *reden* van de vervanging of reparatie is wellicht te vinden en daarmee hopelijk de oorzaak van het falen van het onderdeel. Als de levensduren niet in gebruikseenheden maar in kalendertijd zijn gegeven, is het vaak mogelijk toch tot benaderde levensduren in gebruikseenheden te komen, indien van het onderdeel het aantal gebruikseenheden per kalendertijdseenheid bekend is.

Zoals reeds eerder is betoogd moeten wij de, vaak verschillende, *oorzaken* onderscheiden die tot falen hebben geleid. Een overlevingskarakteristiek die geschat is uit levensduren waartussen geen onderscheid naar oorzaak van beëindiging gemaakt is, kan welliswaar waarde hebben bij het bepalen van de kansverdeling van de vraag – ongedifferentieerd naar oorzaak – naar een reserveonderdeel en daarmee bij het beheersen van de onderdelenvoorraad; de karakteristiek geeft evenwel niet die informatie welke we nodig hebben voor het bepalen van een onderhoudsconcept.

Stel nu dat bij de waargenomen levensduren er enige zijn die beëindigd zijn door een bepaalde oorzaak waarin wij geïnteresseerd zijn. Deze levensduren geven ons informatie over de overlevingskarakteristiek met betrekking tot die bepaalde oorzaak; maar niet alleen deze levensduren doen dat, ook de levensduren die zijn beëindigd door andere oorzaken, of die nog helemaal niet beëindigd zijn.

Een klein voorbeeld kan dit verduidelijken. Stel dat wij levensduurwaarnemingen hebben van vier exemplaren van een bepaald onderdeel: 100, 200, 300 en 400 draaiuren; die van 100 en 400 draaiuren zijn gesneuveld ten gevolge van een oorzaak waarin wij geïnteresseerd zijn, die van 200 en 300 ten gevolge van andere, niet aan deze oorzaak gerelateerde, oorzaken. Dat wil zeggen dat er twee exemplaren zijn die na 200, respectievelijk 300 draaiuren nog steeds niet ten gevolge van de te onderzoeken faaloorzaak aan hun einde zijn gekomen. Als wij nu de kans op overleven van de te onderzoeken storingsoorzaak zouden schatten uit *alleen* de twee daarmee corresponderende beëindigde levensduren, dan zouden wij bij bijvoorbeeld 150 draaiuren krijgen: $\hat{R}(150) = 1/2$, want slechts een van de twee levensduurwaarnemingen gaat de 150 draaiuren te boven.

(Het 'dakje' (^) boven de R duidt aan dat wij met een *schatting* van R te maken hebben en niet met de werkelijke, onbekende waarde van R).

Als wij echter ook de twee andere waarnemingen meenemen bij onze schatting, dan krijgen wij $\hat{R}(150) = 3/4$, want drie van de vier levensduren zijn na 150 draaiuren nog niet door de te onderzoeken oorzaak beëindigd. Het is duidelijk dat, met betrekking tot de overlevingskansen van de te onderzoeken storingsoorzaak, de laatste schatting correct is en de eerste tot een ongewilde onderschatting leidt.

De twee waarnemingen van 200 en 300 draaiuren in bovenstaand voorbeeld noemt men 'gecensureerd' met betrekking tot de storingsoorzaak waarin wij zijn geïnteresseerd.

- Censurering

Gecensureerde waarnemingen met betrekking tot een bepaalde storingsoorzaak zijn waarnemingen die slechts een ondergrens aangeven van de levensduur met betrekking tot die bepaalde storingsoorzaak. De werkelijke waarde die zo een levensduur eventueel zou hebben bereikt, is als het ware onderdrukt door andere oorzaken, die als *cursor* zijn opgetreden. Bij het onderzoek naar de overlevingskarakteristiek van een onderdeel met behulp van gegevens uit het onderhoudsarchief stuiten wij vaak op levensduren die als gecensureerd moeten worden beschouwd. Er zijn twee vormen van gecensureerde waarnemingen.

De eerste vorm komt overeen met het eenvoudigweg *nog niet* beëindigd zijn van de levensduur. Bijvoorbeeld de laatste linker voorband die er aan een auto is gemonteerd heeft momenteel al 20.000 km gelopen en hij is nog steeds in goede conditie. Wij weten dat zijn levensduur, die ten slotte door welke oorzaak dan ook beëindigd zal worden, in ieder geval de 20.000 km te boven gaat.

De tweede vorm van censurering treffen wij aan bij een levensduur die welliswaar is beëindigd, maar *niet door de oorzaak waar het ons om gaat*. Stel dat wij bijvoorbeeld een onderzoek doen naar de 'normale' levensduur van banden. Wij hebben een band die na 15.000 km door een op de weg liggende kapotte fles volkomen uit elkaar is gereten. Wij kunnen dan concluderen dat de levensduur van die band met betrekking tot 'normale slijtage' ten minste 15.000 km is geweest, wat ook maar de werkelijke waarde zou zijn geweest als die band *niet* door de 'externe oorzaak' aan zijn einde zou zijn gekomen. Als wij daarentegen een onderzoek doen naar het aantal kilometers dat een band aflegt, tot hij door een op de weg liggende fles of iets dergelijks getroffen wordt, dan is de geobserveerde levensduur van 15.000 km natuurlijk een gewone, voltooide, *niet* gecensureerde waarneming. Zo kan, afhankelijk van de oorzaak van het einde van de levensduur waarin wij geïnteresseerd zijn, een waargenomen levensduur als gecensureerd of niet-gecensureerd moeten worden beschouwd. En het is de overlevingskarakteristiek met betrekking tot een bepaalde oorzaak die wij nodig hebben bij het bepalen van een goed onderhoudsconcept.

Het bepalen of een gegeven levensduur als een gecensureerde of niet-gecensureerde waarneming moet worden beschouwd, vereist soms extra informatie of technisch inzicht. Bijvoorbeeld: het uit voorzorg vervangen van een machine-onderdeel dat bij een inspectie na 300 draaiuren bijna versleten blijkt te zijn, maar dat misschien toch nog wel een tiental draaiuren mee had gekund, leidt tot een waargenomen levensduur van iets meer dan 300 uur die, met betrekking tot de faaloorzaak 'slijtage' *niet* gecensureerd is. De reden om die levensduur als niet-gecensureerd te beschouwen is het feit dat de deplorabele toestand van het onderdeel aanleiding was om het te vervangen: het was, praktisch gesproken, aan het eind van zijn leven. Maar een nieuwe autoband, die na 500 km vervangen moet worden omdat hij door glasscherven is vernield, geeft met betrekking tot slijtage een gecensureerde levensduur van 500 km; immers de vervanging heeft zelfs in de verste verte niets te maken met slijtageverschijnselen.

Om een waargenomen levensduur met recht als gecensureerd te kunnen beschouwen moet het proces dat tot censurering leidt onafhankelijk zijn van het proces dat uiteindelijk tot storing zou hebben geleid.

Slecht uitgevoerde montage of foutieve uitlijning zijn niet zelden voorkomende censureringsoorzaken.

– Trend

Wij zijn nu zover dat wij, naar wij aannemen, een chronologisch lijstje met levensduren hebben met van iedere waarneming een indicatie of deze als gecensureerd of niet-gecensureerd beschouwd moet worden met betrekking tot de storingsoorzaak waarin wij zijn geïnteresseerd. Een gefingeerd, maar wel verhelderend, voorbeeld wordt gevormd door de volgende reeks waarnemingen in *chronologische* volgorde (een pijltje ↑ identificeert de waarnemingen die als gecensureerd moeten worden beschouwd):

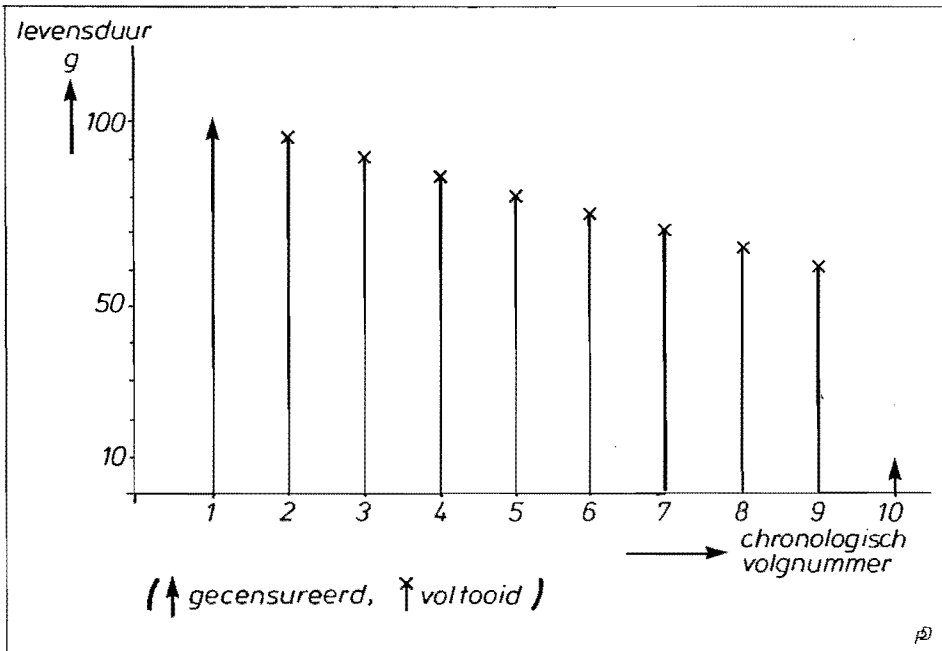
100 ↑, 95, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 10 ↑.

Ook zonder een grafiek te maken van deze elkaar in de tijd opvolgende waarnemingen ligt er een conclusie voor de hand: de standtijden worden steeds korter. Hebben wij wellicht te maken met exemplaren die steeds vaker zijn gerevideerd om 'als nieuw' (?) weer in het onderdelenmagazijn te worden opgenomen? Of, als de onderdelen echt allemaal fabrieksnieuw waren, is dan wellicht de machine waarin ze dienst doen zodanig aan het verslijten, dat deze een steeds grotere aanslag doet op de nieuwe onderdelen? Of is de kwaliteit van nieuwe onderdelen wellicht aan het achteruit gaan? In ieder geval zouden wij de waarnemingen niet durven beschouwen als willkeurige representatieve trekkingen uit een homogene populatie van exemplaren die onder vergelijkbare omstandigheden hebben gefunctioneerd. En zolang wij niet over één populatie kunnen spreken, kunnen wij niet over de overlevingskarakteristiek van de populatie spreken.

(Misschien is het in het voorgaande voorbeeld mogelijk om de waargenomen levensduren in te delen in subgroepen, bijvoorbeeld 'na nieuw', 'na eerste revi-

sie', 'na tweede revisie', en dan, voor deze hopelijk homogene subgroepen, apart overlevingskarakteristieken te schatten.)

Het bovenstaande leidt tot de conclusie dat wij, voordat wij eventueel overgaan tot het schatten van de overlevingskarakteristiek, moeten onderzoeken of wij wel met één homogene populatie hebben te maken. Waar wij vooral voor op onze hoede moeten zijn is een 'trend' van toenemende of afnemende levensduren met het chronologisch volgnummer. Een simpel hulpmiddel is een grafiek te maken van de waarnemingen tegen het chronologisch volgnummer, zoals in figuur 13 is gedaan voor de waarnemingen uit het voorbeeld.

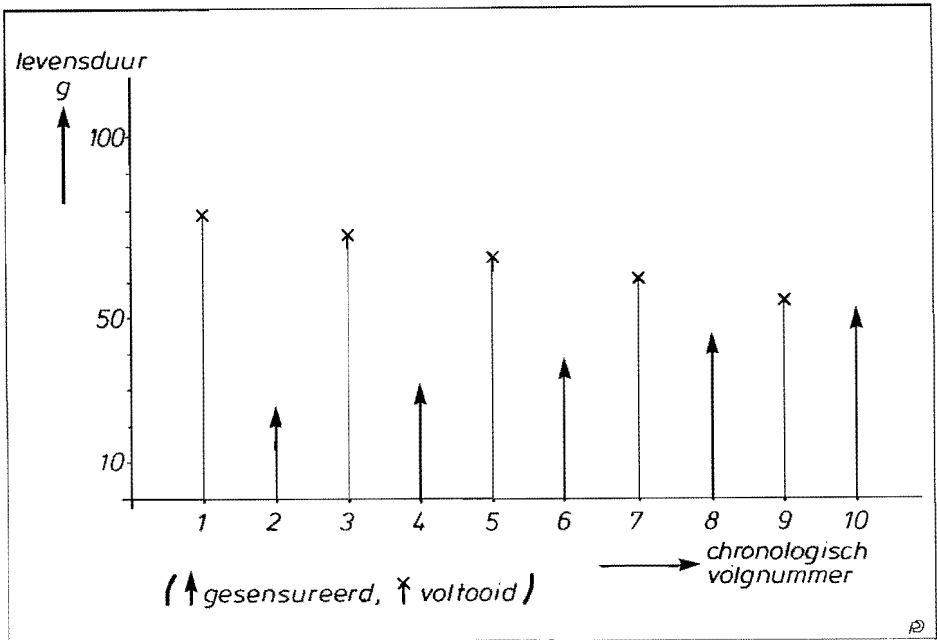


Figuur 13. Tien levensduurwaarnemingen in chronologische volgorde

Hier lijkt, zoals reeds opgemerkt, een duidelijke trend aanwezig te zijn. De enige waarneming die het monotoon afnemen van de reeks zou kunnen verstoren is de laatste, indien deze – na eventueel voltooid te zijn – zou blijken groter dan 60 te zijn

Het grafisch onderzoek op trend is niet moeilijk als er relatief weinig gecensureerde waarnemingen zijn. Als er helemaal geen gecensureerde waarnemingen zijn kunnen de in de kwaliteitsbeheersing bekende *Cumulatieve Somkaarten* ook hulp bieden.

Als er relatief veel gecensureerde waarnemingen zijn wordt het trekken van conclusies over een eventueel aanwezige trend moeilijk, zie figuur 14. Hier hangt de conclusie van (negatieve) trend of geen trend sterk af van de niet waar te nemen



Figuur 14. Levensduurwaarnemingen in chronologische volgorde

waarden die de gecensureerde levensduren zouden hebben bereikt als zij beëindigd hadden kunnen worden door de te onderzoeken storingsoorzaak. Technisch inzicht kan soms uitkomst bieden bij het concluderen tot de aan- of afwezigheid van een trend.

Ook al maakt de aanwezigheid van een trend het schatten van een overlevingskarakteristiek uit de waarnemingen zinloos, het ontdekken ervan is vaak zijn eigen beloning in de vorm van toegenomen inzicht in bijvoorbeeld slijtageprocessen of de kwaliteit van (gereviseerde) reserveonderdelen.

Als wij na de voorgaande bewerkingen mogen concluderen dat er geen trend in de waarnemingen aanwezig is, dan kunnen wij meestal wel concluderen dat de waarnemingen uit een homogene populatie komen. Ook dan pas heeft het zin om te spreken van 'de' overlevingskarakteristiek van de populatie en over te gaan tot het schatten daarvan uit de ons ter beschikking staande waarnemingen van levensduren.

– De schattingsmethode van Nelson

Na de voorgaande bewerkingen te hebben uitgevoerd gaan wij er nu van uit dat wij een representatieve steekproef hebben van levensduurwaarnemingen uit een homogene populatie van onderdelen. Sommige van die waarnemingen kunnen gecensureerd zijn. Wij zullen nu de methode van Nelson voor het schatten van de overlevingskarakteristiek uiteenzetten; later vatten wij deze methode nog eens samen in een lijst van te volgen stappen.

– *Het schatten van de vorm van de overlevingskarakteristiek*

Om te beginnen zetten wij de waarnemingen nu in volgorde van toenemende grootte. (Wij zullen later terugkomen op wat er moet gebeuren als er twee of meer waarnemingen dezelfde grootte hebben; vooralsnog gaan wij er van uit dat dit niet het geval is.)

Vervolgens markeren wij de gecensureerde waarnemingen, bijvoorbeeld met een pijltje, zoals in tabel 3, die bestaat uit $n = 6$ gefingeerde waarnemingen (in honderdtallen gebruikseenheden, g.e.), waarvan er twee als gecensureerd beschouwd moeten worden.

Voor het eerste interval, van 0 tot 500 g.e., gaat dit als volgt: van de 6 exemplaren waarvan wij levensduren hebben is er één, na 500 g.e., aan zijn einde gekomen door de oorzaak waarin wij hier geïnteresseerd zijn; dus de (gemiddelde) storingsgraad over het interval, ter lengte $500 - 0 = 500$ g.e., schatten wij als: $1/6$ gedeeld door $500 = 1/30$ per honderd gebruikseenheden ($1/6 / 500 = 1/30$ per 100).

Voor het tweede interval: van de 5 exemplaren waarvan wij weten dat ze 500 g.e. hebben overleefd is er een bij het bereiken van 800 g.e. gesneuveld; een schatting van de gemiddelde storingsgraad over het interval van 500 tot 800 g.e. is dan: $1/5 / (800 - 500) = 2/30$ per 100 g.e.

Tabel 3. Berekeningen voor de methode van Nelson

Rang- num- mer	Levens- duur [g.e. * 10 ²]	Storingsgraad [1/(g.e.*10 ²)]	Opper- vlak	Cumulatief oppervlak	
i	g	z(g)	z(g)Δg	Σ zΔg = f(g)	n - i + 1
1	5	1/6 /(5-0)	1/6	1/6 = 5/30 = 0,167	6
2	8	1/5 /(8-5)	1/5	1/6 + 1/5 = 11/30 = 0,367	5
3	12	0 /(12-8)	0	11/30 + 0 = 11/30 = 0,367	4
4	17	1/3(17-12)	1/3	11/30 + 1/3 = 21/30 = 0,700	3
5	19	0 /(19-17)	0	21/30 + 0 = 21/30 = 0,700	2
6	25	1/(25-17)	1	21/30 + 1 = 51/30 = 1,700	1

Nu komen wij bij de gecensureerde waarnemingen van 1200 g.e.

Van de 4 exemplaren waarvan wij weten dat ze 800 g.e. overleefd hebben is er niet één die in het interval van 800 tot 1200 g.e. aan zijn einde gekoem is *ten gevolge van de oorzaak die ons hier interesseert*. Dus wij schatten de storingsgraad ten gevolge van de oorzaak van het interval van 800 tot 1200 g.e. als $0/4 / (1200-800) = 0$ per 100 g.e.

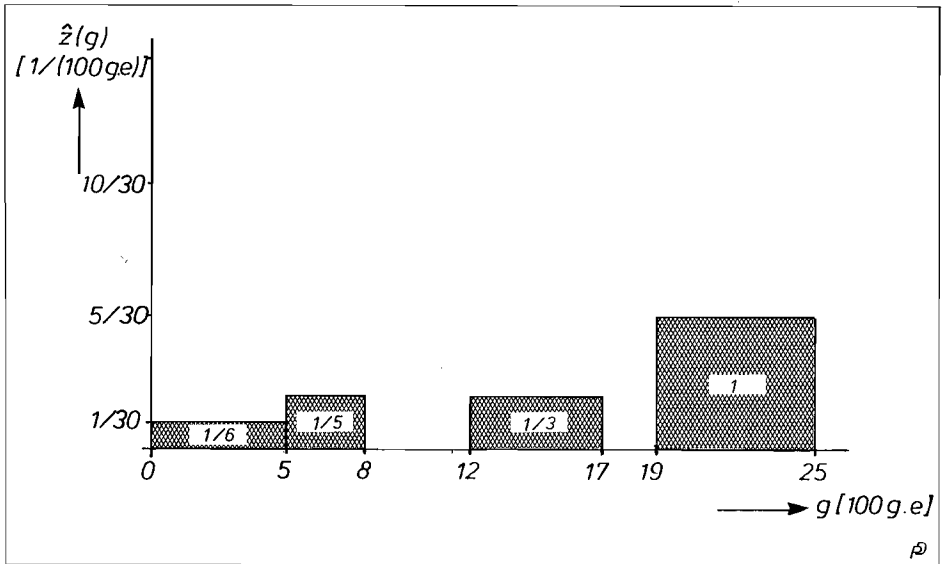
Of het exemplaar dat de gecensureerde waarneming van 1200 g.e. heeft geleverd de te onderzoeken storingsoorzaak nog veel langer zou hebben overleefd weten we niet; het heeft de kans niet gekregen. Maar wij weten wèl dat er drie andere

exemplaren zijn die de te onderzoeken storingsoorzaak meer dan 1200 g.e. hebben overleefd. Bij 1700 g.e. sneuvelde er daarvan één tengevolge van die oorzaak, dus onze schatting van de gemiddelde storingsgraad over het interval 1200 tot 1700 g.e. bedraagt:

$$1/3 / (1700-1200) = 2/30 \text{ per } 100 \text{ g.e.}$$

Zo werken wij de tabel af tot en met de zesde waarneming. Wij zouden nu een grafiek als figuur 17 kunnen tekenen met de geschatte waarde van de storingsgraad over de verschillende intervallen. Als wij nu het oppervlak onder ieder deel van de storingsgraadcurve berekenen, geheel naar analogie met figuur 12, dan komen wij op de deeloppervlakken die in tabel 3 onder $\hat{z}(g)\Delta g$ zijn aangegeven en die gecumuleerd onder $\sum \hat{z}(g)\Delta g = \hat{H}(g)$ zijn aangegeven.

Merk op dat in tabel 3, bij de niet-gecensureerde waarnemingen van de breuk die onder $\hat{z}(g)\Delta g$ verschijnt de teller altijd gelijk is aan 1, en de noemer gelijk is aan het rangnummer dat de waarneming zou gekregen hebben als de rangnummers in volgorde van langste naar kortste levensduur zouden zijn gegeven, zoals aangegeven in de kolom onder $n-i + 1$.

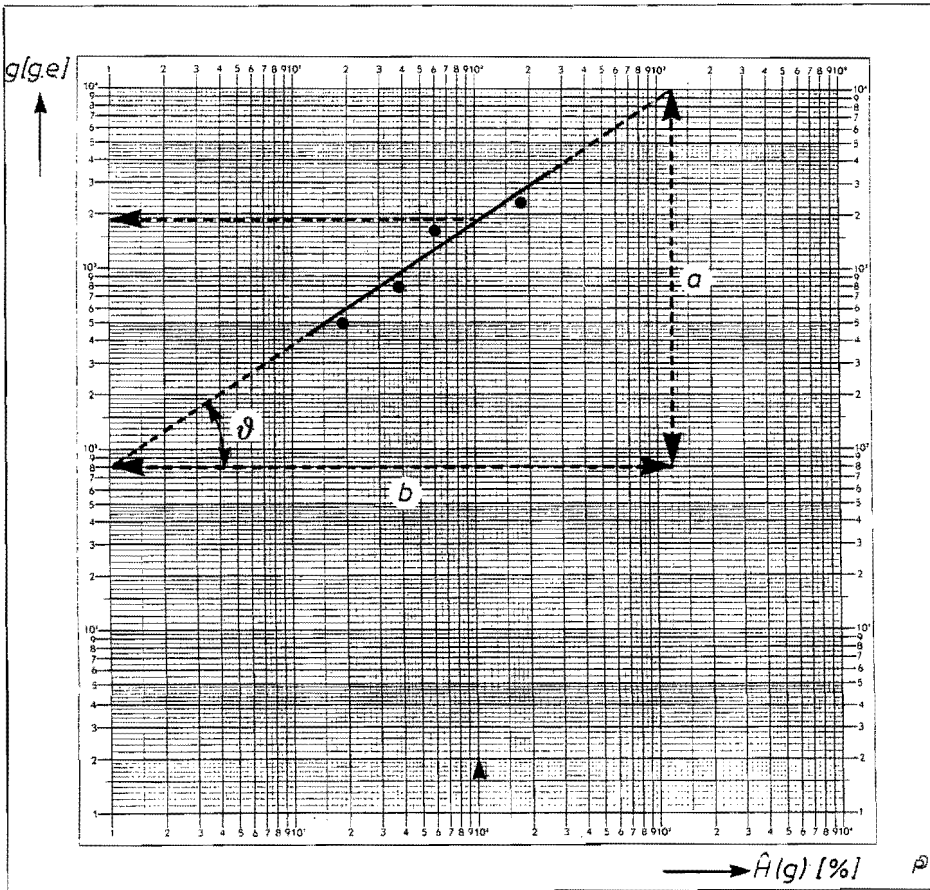


Figuur 15. Schattingen van de storingsgraad uit gegevens van tabel 3

Zo hebben onze waarnemingen $g_1 = 500$ g.e., $g_2 = 800$ g.e. etc., geleid tot $\hat{H}(g_1) = 1/6$, $\hat{H}(g_2) = 11/30$ etcetera, dat wil zeggen tot schattingen van het oppervlak onder de werkelijke storings graadcurve (die wij niet kennen) voor verschillende waarden van g . Alleen de waarden van $\hat{H}(g)$ voor niet-gecensureerde waarden van g zijn interessant, want bij gecensureerde waarnemingen verandert de waarde van $\hat{H}(g)$ niet zoals uit tabel 3 blijkt

Wij zetten nu, geheel analoog aan figuur 11, op dubbel logaritmisch grafiekenpapier de waarde van g uit tegen de bijbehorende waarde van $\hat{H}(g)$.

Dat doen wij voor alle paren $\{\hat{H}(g_1), g_1\}$, $\{\hat{H}(g_2), g_2\}$ enzovoort waarvoor de levensduur *niet* gecensureerd is. Als deze punten nu, zij het met enige strooiing, om een *rechte lijn* liggen, dan kunnen wij concluderen dat wij met een Weibull overlevingskarakteristiek van de vorm $R(g) = e^{-(g/\alpha)^\beta}$ te maken hebben. Als niet meer dan één punt een verdacht grote afwijking van de rechte lijn vertoont, dan doen wij bij het trekken van die rechte alsof dat punt niet bestaat. Dan kunnen wij ook de waarden van de parameters α en β van die Weibull overlevingskarakteristiek gaan schatten. Als de punten *niet* om een rechte lijn liggen, maar een duidelijk afwijkend patroon vertonen, dan hebben wij niet met een Weibull overlevingskarakteristiek van de vorm $R(g) = e^{-(g/\alpha)^\beta}$ te maken, maar met een andere. Wat ons dan voor mogelijkheden overblijven, wordt in de volgende paragraaf besproken.



Figuur 16. De zogenaamde 'Cumulatieve hazard plot'

In figuur 16 zijn op dubbel logaritmisch papier de punten $\{\hat{H}(g_i), g_i\}$ uit tabel 3 in grafiek gebracht voor de niet-gecensureerde waarnemingen $i = 1, 2, 4$ en 6 . Ze worden inderdaad goed door de ingetekende rechte lijn benaderd.

(Met slechts vier punten zijn eventueel afwijkende patronen natuurlijk moeilijk te herkennen.)

Wij kunnen nu concluderen dat de levensduren van het onderhavige onderdeel, voor zover ze worden beëindigd door de storingsoorzaak die aanleiding gaf tot ons onderzoek, een Weibull overlevingskarakteristiek van de vorm $R(g) = e^{-(g/\alpha)^\beta}$ volgen, althans over het levensduurtraject van ongeveer 400 tot ongeveer 3000 gebruikseenheden. Aangezien wij geen gegevens hebben van levensduren buiten dit traject, kunnen wij niet zeggen of onze conclusie ook geldig is buiten dit traject.

– *Het schatten van de Weibull parameters α en β*

Nu wij er van uit kunnen gaan dat wij te maken hebben met Weibull verdeelde levensduren kunnen wij overgaan tot het schatten van α en β . In hoofdstuk 2 hebben wij gezien dat voor Weibull verdeelde levensduren α gelijk is aan die waarde van g , die overeenkomt met het 100 % punt van $H(g)$. Wij zoeken dus het 100 % punt op de $\hat{H}(g)$ -as van figuur 16, gaan naar boven tot wij de getrokken lijn kruisen en lezen op de g -as onze schatting van α af: $\hat{\alpha} \approx 1850$ g.e.

Ook hebben wij gezien in hoofdstuk 2 dat voor Weibull verdeelde levensduren geldt: $1/\beta = \text{tg } \vartheta = a/b$ (zie figuur 16). Door af meten van de lengten van a en b komen wij op een schatting van β en wel $\beta = b/a = 1,5$.

Onze schatting van de overlevingskarakteristiek is dan:

$$\hat{R}(g) = e^{-(g/\alpha)^\beta} = e^{-(g/1850)^{1,5}}$$

Ten slotte kunnen wij met behulp van tabel 1 (hoofdstuk 2) nog schattingen berekenen van de verwachte waarde en de standaard afwijking σ .

$$\hat{\mu} \approx 1850 * 0,90 \approx 1665 \text{ g.e.}$$

$$\hat{\sigma} \approx 1850 * 0,61 \approx 1130 \text{ g.e.}$$

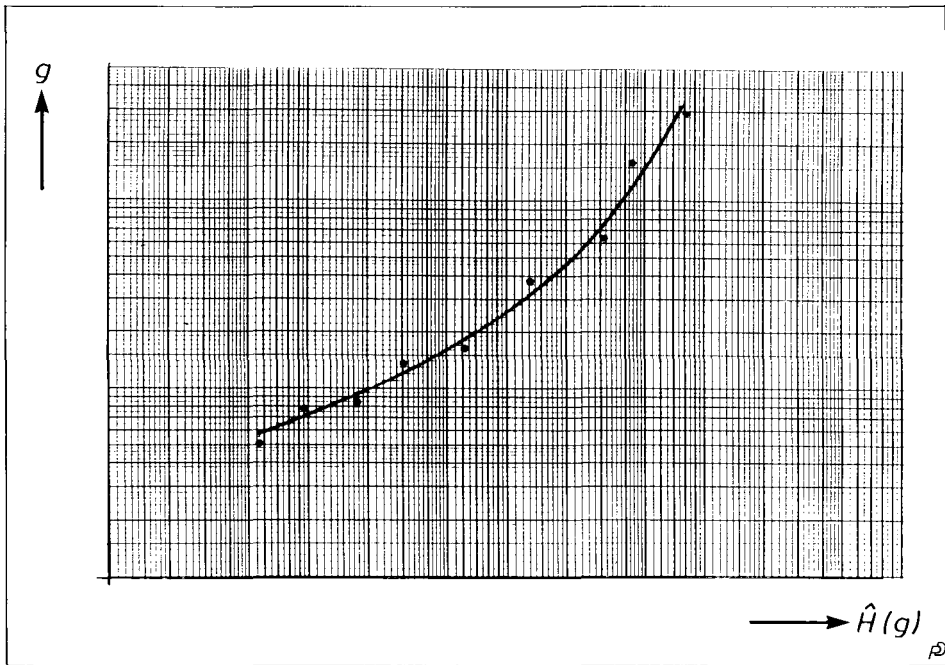
– *Complicaties*

Als wij twee of meer levensduurwaarnemingen hebben met dezelfde waarde, die dus in tabel 3 samen twee of meer rangnummers zouden moeten delen, dan is het logisch dat eventueel gecensureerde waarnemingen de hoogste van die rangnummers krijgen, want hun levensduur is groter dan die van de niet-gecensureerde waarnemingen. De volgorde binnen gecensureerde waarnemingen met gelijke waarden kan willekeurig gekozen worden, evenals die binnen niet-gecensureerde waarnemingen met gelijke waarden.

Het komt voor dat de in grafiek gebrachte punten een patroon vertonen als geschetst in figuur 17: geleidelijk olopend en ten slotte overgaand in een min of meer rechte lijn. Dat duidt erop dat wij niet met een Weibull karakteristiek van de vorm

$R(g) = e^{-(g/\alpha)^\beta}$ te doen hebben, maar wellicht met een Weibull karakteristiek van de vorm:

$R(g) = e^{-\frac{(g-\gamma)^\beta}{\alpha}}$, waarin g slechts waarden $\geq \gamma$ mag aannemen en zou kunnen worden geïnterpreteerd als een ‘dode tijd’: de geaccumuleerde levensduur begint pas echt mee te tellen nadat er γ gebruikseenheden zijn verstreken. Dit kan worden getest door van alle levensduren, inclusief de gecensureerde, een-



Figuur 17. Indicatie mogelijkerwijze $j > 0$

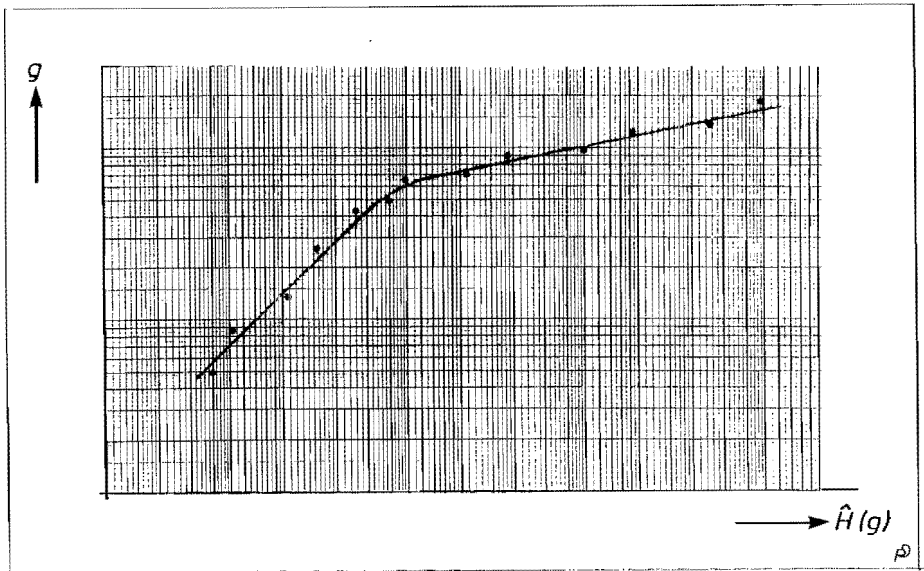
zelfde bedrag tussen 0 en de kleinste niet-gecensureerde levensduur af te trekken, daarna de methode van Nelson opnieuw toe te passen, en te zien of het puntenpatroon dan wel door een rechte lijn kan worden benaderd. Soms kan zo, door ‘trial and error’, één, van alle waarnemingen af te trekken, waarde gevonden worden die het patroon wel volgens een rechte lijn doet verlopen (afgezien van enige strooiing). Die waarde is dan een schatting $\hat{\gamma}$ van γ . De waarden van α en β kunnen daarna weer met behulp van de nu in te tekenen rechte lijn geschat worden. De schatting van de overlevingskarakteristiek is dan:

$$\hat{R}(g) = e - \left(\frac{g-\gamma}{\alpha}\right)^\beta \quad \text{voor } g \geq \gamma$$

en

$$\hat{R}(g) = 1 \quad \text{voor } 0 \leq g < \gamma.$$

Als het met deze kunstgreep niet lukt het puntenpatroon 'recht te trekken' dan hebben wij niet met een Weibull overlevingskarakteristiek te maken.



Figuur 18. Indicatie dat de niet-gecensureerde levensduren toch op meer dan een storingsoorzaak betrekking hebben

Soms vertoont het puntenpatroon twee (of zelfs meer) min of meer rechte takken, zoals in figuur 18. De interpretatie van zo een verschijnsel is dat de levensduren tot aan de knik kunnen worden beschreven door een Weibull karakteristiek, en de levensduren na de knik door een andere Weibull karakteristiek, die vaak een hogere β -waarde heeft dan de eerste. Meestal betekent dit dat, ondanks de voorbewerking en schifting van de gegevens, de niet-gecensureerde levensduren toch op twee (of meer) verschillende storingsprocessen betrekking hebben: één met een, ook bij hogere leeftijden matige, vaak constante, storingsgraad, en een andere waarvan de storingsgraad bij hogere levensduren die van het eerste proces helemaal domineert. In figuur 7 (gecombineerde storingsgraad) wordt een dergelijke situatie geïllustreerd.

De geopperde mogelijke oorzaak van dit verschijnsel (een niet correcte schifting van de levensduren naar storingsoorzaak) kan soms geverifieerd worden door de opgegeven storingsoorzaken aan een nadere analyse te onderwerpen.

In ieder geval kunnen de verschillende overlevingskarakteristieken weer geschat

worden door de levensduurgegevens te scheiden. De levensduurgegevens tot aan de knik vormen dan een subgroep, en die erna een andere subgroep. Op ieder van de subgroepen afzonderlijk wordt dan weer de methode van Nelson toegepast.

Als het puntenpatroon duidelijke afwijkingen van een rechte lijn vertoont en geen van bovengenoemde complicaties speelt een rol, dan moeten wij concluderen dat wij de levensduren niet met een (of meer) Weibull verdeling(en) kunnen beschrijven. Dit komt echter, dankzij de flexibiliteit van de Weibull verdeling, zelden voor, zo wijst de ervaring uit.

Welke overlevingskarakteristiek dan wel een goede beschrijving zou kunnen geven is iets dat kan worden onderzocht met andere soorten (niet dubbel logaritmisch) grafiekenpapier. Op die andere soorten papier zijn de assen ook weer zodanig ingedeeld dat de punten $\{\hat{H}(g_i), g_i\}_1$ een rechte lijn vormen (behoudens enige niet-systematische strooiing daar rondom) indien de levensduren beschreven kunnen worden door de karakteristiek waar voor het papier is ontworpen. Zo bestaat er bijvoorbeeld grafiekenpapier waarop het puntenpatroon een rechte lijn vormt indien de levensduren een Normale verdeling volgen. Voor details verwijzen wij naar Nelson (1969, 1982)^{2,3}.

Levensduurgegevens over de verschillende exemplaren van een bepaald onderdeel die op een bepaalde plaats in eenzelfde machine gediend hebben en die ten gevolge van eenzelfde oorzaak zijn bezweken, zijn bijna altijd klein in aantal. Zelden heeft men er meer dan, zeg 10 à 20. Soms zijn er zo weinig gegevens dat men in de verleiding komt om groepjes levensduren van exemplaren van hetzelfde onderdeel die in andere, nominaal identieke machines zijn gemonteerd geweest of op een andere plaats in dezelfde machine, ook maar bij de te onderzoeken levensduren te voegen, in de hoop een nauwkeuriger schatting van $R(g)$ te krijgen. Alvoers men voor die verleiding bezwijkt, is het raadzaam om de gegevens toch eerst groep voor groep met de methode van Nelson te analyseren, bij voorkeur op hetzelfde vel grafiekenpapier. Niet zelden blijkt namelijk dat onderdelen, die in verschillende, hoewel nominaal identieke, machines gediend hebben of in dezelfde machine op verschillende plaatsen, toch aanmerkelijk verschillende levensduurkarakteristieken vertonen. Dat kan op zichzelf een interessante ontdekking zijn. Alleen als na analyse blijkt dat de onderscheiden groepen gegevens tot ongeveer dezelfde overlevingskarakteristiek leiden, is het toelaatbaar de groepen samen te voegen en als een groep verder te gebruiken voor het schatten van een gezamenlijke overlevingskarakteristiek. Naarmate er minder niet-gecensureerde gegevens per groep zijn mag men een ruimere marge toepassen bij het oordeel over het gelijk zijn van de overlevingskarakteristieken.

3.4 Samenvatting

1. Sorteert de levensduren naar storingsoorzaak. Levensduren die door de te onderzoeken oorzaak zijn beëindigd, zijn niet-gecensureerd. Alle andere levensduren moeten in principe als gecensureerd worden beschouwd.
2. Onderzoek of er een trend bestaat in de chronologische geordende levensduren. Als die bestaat kunnen wij niet spreken van 'de' overlevingskarakteristiek van 'het' onderdeel en houdt de schattingsprocedure op.
3. Als er geen trend aanwezig is, construeer dan een tabel zoals tabel 4 met de levensduren in volgorde van toenemen de grootte.
4. Geef de waarnemingen rangnummers van onderen naar boven.
5. Markeer de levensduren die als gecensureerd moeten worden beschouwd.
6. Alleen voor de niet-gecensureerde waarnemingen: zet in de kolom $\hat{z}(g)\Delta g$ het getal $1/(\text{het in stap 4 gegeven rangnummer})$.

Tabel 4. Verkorte versie van tabel 3.

Levensduur g	Tegengesteld rangnummer	$\hat{z}(g)\Delta g$	$\hat{H}(g)$
500	6	$1/6 = 0,1667$	0,1667
800	5	$1/5 = 0,2000$	0,3667
1200†	4		
1700	3	$1/3 = 0,3333$	0,7000
1900†	2		
2500	1	$1/1 = 1,0000$	1,7000

7. Cumuleer de in stap 6 gevonden waarden in de kolom $\hat{H}(g)$.
8. Zet de punten $\{\hat{H}(g), g\}$ uit op dubbel logaritmisch grafiekenpapier.
9. Als de punten op een rechte lijn liggen afgezien van niet-systematische strooiing, trek dan die lijn en bepaal $\hat{\alpha}$ en $\hat{\beta}$.

De schatting van de overlevingskarakteristiek is dan:

$$\hat{R}(g) = e^{-(g/\hat{\alpha})^{\hat{\beta}}}$$

10. Als het puntenpatroon systematische afwijkingen van een rechte lijn vertoont, zoals een duidelijke curvatuur, of als het door verschillende rechte lijnstukken beschreven kan worden, zie dan de paragraaf complicaties. Als dit ook niet baat raadpleeg dan Nelson (1969, 1982).

Literatuur

1. Wijvekatte, M.L., *Verklarende Statistiek* (Aula boek 39), Utrecht Het Spectrum 1972
2. Nelson, W., Hazard plotting for incomplete failure data, *Journal of Quality Technology*, 1 (1969), 27-52
3. Nelson, W., *Applied life data analysis*, New York, John Wiley & Sons, 1982.

Onderhoudsconcept en onderhoudsbeheersing

11

Dr.ir. C.W. Gits

A. Het onderhoudsconcept

Het onderhoudsconcept van een technisch systeem schrijft het uit te voeren onderhoud voor. De eisen waaraan een concept moet voldoen worden gespecificeerd. Een ontwerpkader dat aan deze eisen plaats biedt wordt gepresenteerd. Tenslotte worden conclusies en voorstellen voor verder onderzoek geformuleerd.

1. Inleiding

Lange tijd waren de gevolgen van storingen van technische systemen betrekkelijk gering en kon worden volstaan met correctief onderhoud. Gedwongen door een toenemende nadruk op kwaliteit, flexibiliteit en leverbetrouwbaarheid in het productieproces en door het kostbaarder worden van de onderhoudsuitvoering wordt meer en meer onderkend dat preventief onderhoud is gewenst. Deze ontwikkeling vereist een systematische benadering van het onderhoudsconcept: het geheel van regels dat voorschrijft hoe een technisch systeem zal worden onderhouden.

In de operations research is veel aandacht besteed aan een modelmatige aanpak van dit probleem. Een aantal van deze bijdragen verschaffen inzicht in de elementen die een rol spelen bij het vaststellen van regels (Morse¹, Barlow/Proschan², Geurts³). In het merendeel van de publikaties is de praktische bruikbaarheid echter ondergeschikt gemaakt aan de mathematische elegantie. Aanzetten tot systematisering vanuit de praktijk zijn schaars. Geraerds⁴ benadrukt in een algemeen overzicht van de onderhoudstheorie het belang van het 'maintenance conception', de verzameling regels over het onderhouden van een object. De vraag hoe zo een verzameling tot stand komt is niet aan de orde. Kelly⁵ presenteert een

nogal pragmatische benadering die uiteindelijk moet leiden tot een 'maintenance plan'. Dit plan vertoont overeenkomsten met een concept, wijkt echter op punten ook beduidend af. Nowlan/Heap⁶⁾ ontwikkelen een methodiek om te komen tot 'Reliability Centered Maintenance Programs'. Zo een programma is een verzameling onderhoudstaken, die een gespecificeerde betrouwbaarheid tegen minimale kosten garandeert. Over de frequentie waarmee die taken moeten worden uitgevoerd laten zij zich niet uit.

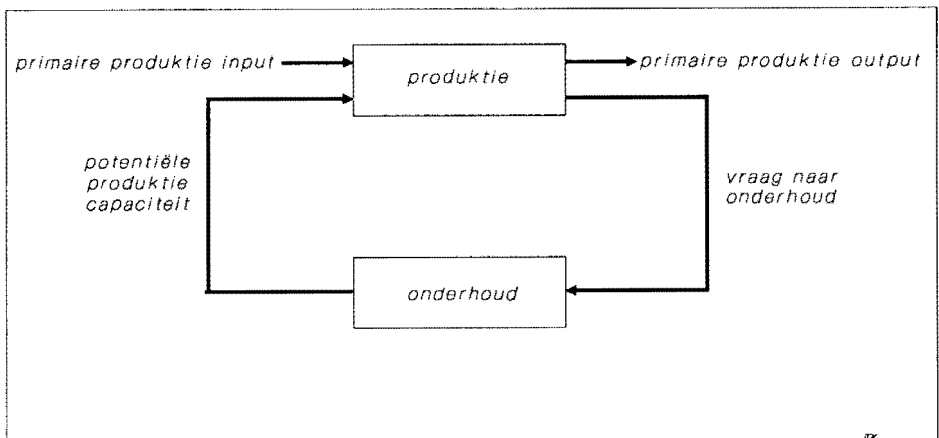
Al met al kan worden geconcludeerd dat de bestaande theorie te kort schiet. Dit artikel beoogt in deze leemte te voorzien.

In paragraaf 2 wordt het onderhoudsconcept nader omschreven. De eisen waaraan een concept moet voldoen worden in paragraaf 3 gespecificeerd. Paragraaf 4 geeft de stappen weer die moeten worden doorlopen bij het ontwerpen van een concept. Tenslotte worden in paragraaf 5 enige afrondende opmerkingen gemaakt.

2. Onderhoudsconcept

Het primaire proces in een bedrijf (fig. 1) is productie waarin de primaire productie-input (materiaal, energie, mankracht) wordt omgezet in de primaire productie-output (het produkt).

Bij deze transformatie worden technische systemen ingezet.

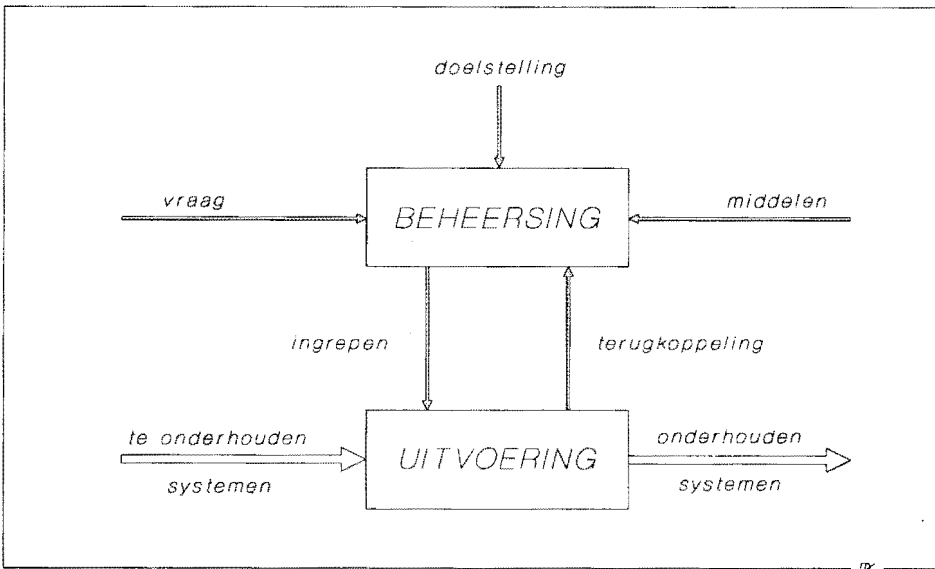


Figuur 1. De relatie tussen productie en onderhoud

Een *technisch systeem* is een verzameling fysieke elementen die van uit onderhoudsoogpunt als een entiteit wordt beschouwd. De *staat* van een technisch systeem is de gesteldheid van de eigenschappen die relevant worden geacht voor vervulling van de functie van het systeem. Externe factoren, veroudering en gebruik

zijn er debet aan dat deze staat achteruitgaat. Dit leidt onvermijdelijk tot een secundaire productie-output: vraag naar onderhoud. De uitvoering van onderhoud resulteert in een secundaire productie-input: potentiële productiecapaciteit.

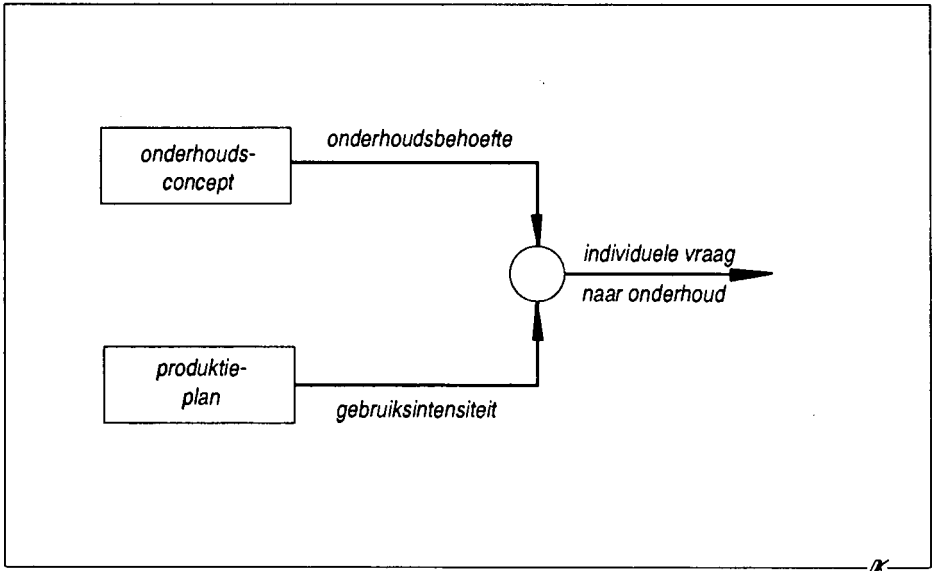
In deze visie is *onderhoud* het geheel van activiteiten dat ten doel heeft de technische systemen in een bedrijf in die staat te houden of terug te brengen die nodig wordt geacht voor vervulling van de productiefunctie. In deze definitie staat 'terugbrengen' voor *correctief onderhoud* en 'houden in' voor *preventief onderhoud*. Er is sprake van een *storing* van een technisch systeem indien het systeem zich niet meer in de gewenste staat bevindt.



Figuur 2. Onderhoudsbeheersing en onderhoudsuitvoering

Onderhoudsbeheersing (fig. 2) beoogt de onderhoudsmiddelen zodanig aan de vraag naar onderhoud toe te wijzen dat aan de onderhoudsdoelstelling wordt voldaan. De doelstelling en de middelen zijn op een hoger beheersingsniveau vastgelegd en worden in dit artikel als gegeven beschouwd. De vraag naar onderhoud is de optelsom van de vraag per individueel technisch systeem. De vraag naar onderhoud van één technisch systeem (figuur 3) wordt bepaald door het productieplan en het onderhoudsconcept.

Het *productieplan* specificiert de inzet van het systeem in het productieproces. Het *onderhoudsconcept* omvat de regels die voorschrijven welke operaties aan het systeem moeten worden uitgevoerd en hoe de behoefte aan die operaties wordt geactiveerd.



Figuur 3. De individuele vraag naar onderhoud

3. Eisen

De relatie tussen onderhoudsconcept, onderhoudsvraag en onderhoudsbeheersing impliceert dat een concept moet bijdragen tot verwezenlijking van de onderhoudsdoelstelling. Centraal in deze doelstelling staan de afspraken tussen productie en onderhoud over de veiligheid en de continuïteit van het productieproces. Bij het realiseren van deze afspraken moet worden gestreefd naar aanvaardbare kosten. Deze kosten maken immers deel uit van de kostprijs van de gefabriceerde produkten. Naast de doelstelling leggen ook de ter beschikking gestelde middelen beperkingen op aan het onderhoud dat kan worden uitgevoerd.

Tenslotte is de kwaliteit van de onderhoudsbeheersing gediend met een regelmatige vraag naar onderhoud.

Voor het onderhoudsconcept houdt dit in dat regels zowel effectief als efficiënt dienen te zijn en daarenboven aan specifieke randvoorwaarden voldoen.

– Effectiviteit

De effectiviteit van een onderhoudsregel betreft de juistheid van de wijze van onderhoudsinitiëring (potentiële effectiviteit) en van de onderhoudsoperatie (technische effectiviteit).

Potentiële effectiviteit

De *potentiële effectiviteit* richt zich op de samenhang tussen het gedrag van een specifieke storing en de wijze van onderhoudsinitiëring. Dit resulteert in het onderscheiden van drie categorieën regels:

- storingsafhankelijk onderhoud,
- gebruiksduurafhankelijk onderhoud, en
- toestandsafhankelijk onderhoud.

Storingsafhankelijk onderhoud schrijft initiëring van de behoefte aan onderhoud voor door het optreden van de storing.

Storingsafhankelijk onderhoud is derhalve altijd potentieel effectief.

Gebruiksduurafhankelijk onderhoud schrijft initiëring van de behoefte aan onderhoud voor door het verstrijken van een gebruiksduur. Deze wijze van initiëring is gebaseerd op statistische voorspelling van het storingsgedrag, waarbij de storingsgraad centraal staat.

De *storingsgraad* – bij een geaccumuleerde gebruiksduur van G eenheden – is de intensiteit waarmee die systemen storen die G eenheden hebben gefunctioneerd, zonder dat de storing in kwestie is opgetreden. Gebruiksduurafhankelijk onderhoud is slechts potentieel effectief indien er sprake is van een stijgende storingsgraad (zie figuur 4).

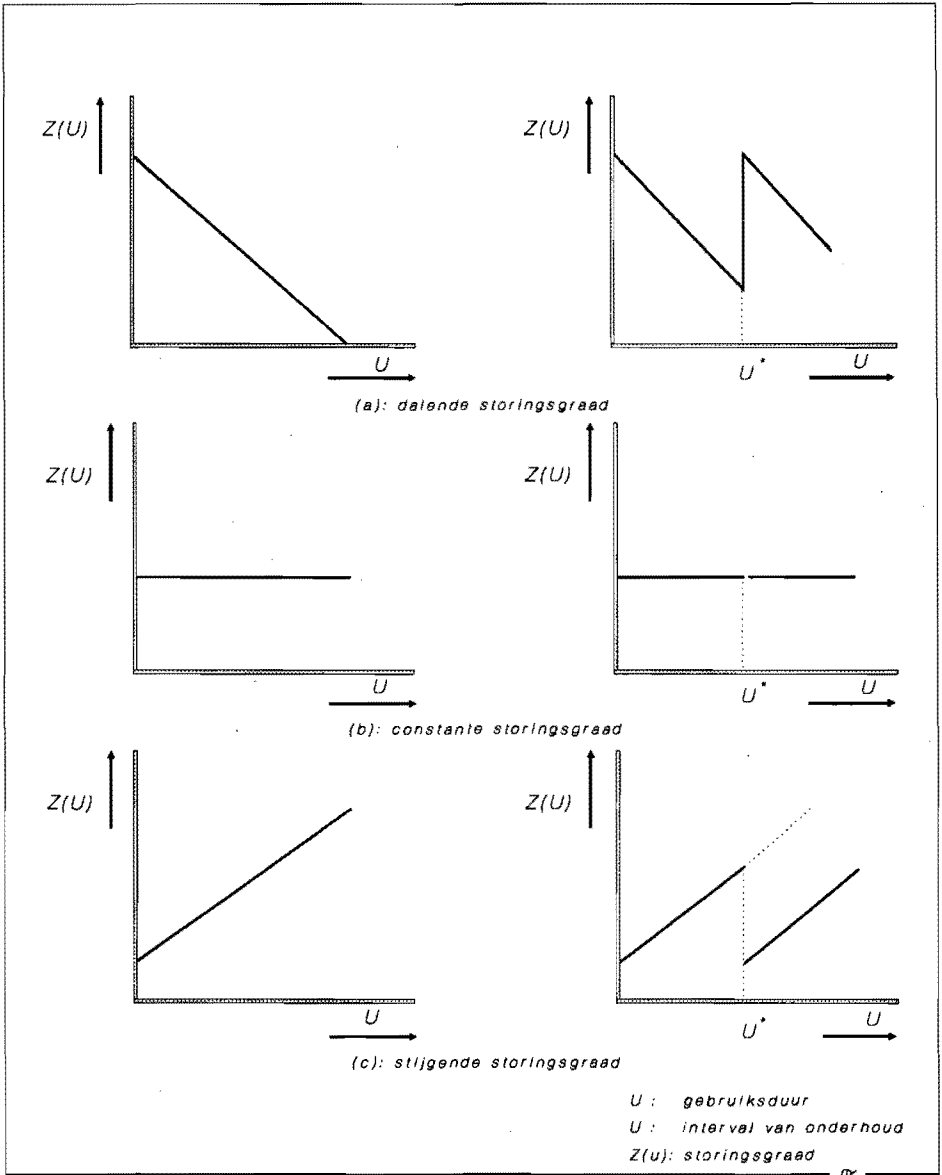
Toestandsafhankelijk onderhoud schrijft initiëring van de behoefte aan onderhoud voor door het bereiken van een toestand. Deze wijze van initiëring is gebaseerd op mechanistische voorspelling van het storingsgedrag, waarbij de karakteristieke eigenschap centraal staat.

Een *karakteristieke eigenschap* is een meetbare fysieke eigenschap waarvan het verloop aanwijzingen bevat over het optreden van de storing. De waarde van deze eigenschap geeft de *toestand* van het technische systeem weer. *Toestandsafhankelijk onderhoud is slechts potentieel effectief indien er sprake is van een karakteristieke eigenschap* (zie figuur 5).

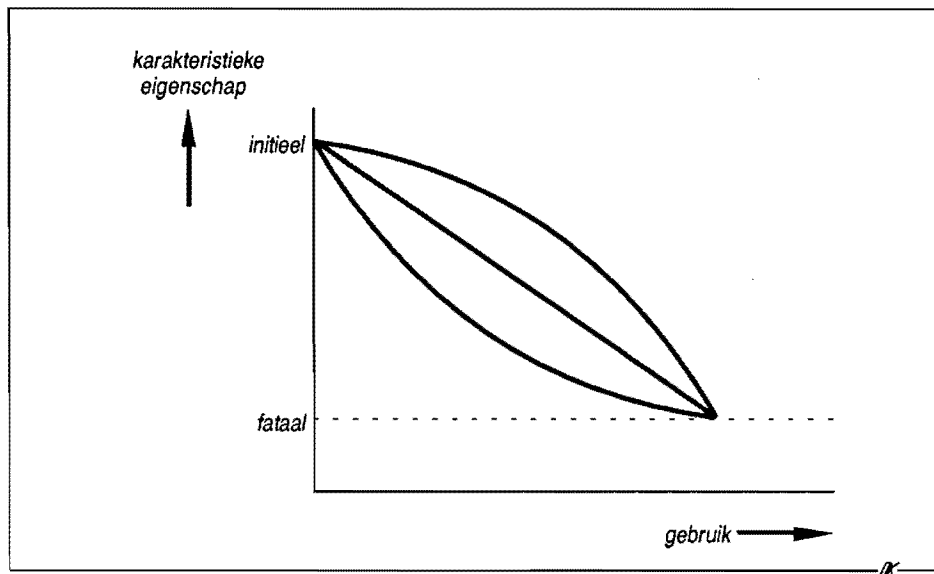
Technische effectiviteit

De *technische effectiviteit* betreft de correctheid van de uit te voeren onderhoudsoperatie. Twee typen operaties kunnen daar bij onderscheiden worden: reparatie en inspectie.

Reparatie transformeert de vigerende staat naar de oorspronkelijke. *Inspectie* meet de actuele toestand en vergelijkt deze met een norm.



Figuur 4. Het effect van gebruiksduurafhankelijk onderhoud



Figuur 5. Degradatietrajecten

Storingsafhankelijk onderhoud schrijft initiëring voor door het optreden van de storing. In dit artikel wordt eenvoudigheidshalve aangenomen dat het bepalen van de technische effectiviteit pas plaats kan vinden nadat de storing is opgetreden. Gebruiksduurafhankelijk onderhoud vereist specificatie in het concept van technisch effectieve reparatie, toestandsafhankelijk onderhoud van inspectie en, indien voldoende informatie over de slijtage aanwezig is, van reparatie.

– Efficiency

De efficiency van een onderhoudsregel betreft allereerst zijn effect op de onderliggende storing (elementaire efficiency), vervolgens zijn economische afhankelijkheid van andere regels (combinatorische efficiency) en tenslotte zijn bijdrage als onderdeel van de totale verzameling regels (ultieme efficiency).

De *elementaire efficiency* richt zich op de afweging van de reductie in storingsgevolgen bewerkstelligd door een onderhoudsregel en de kosten die met de uitvoering van onderhoud volgens deze regel gaan gepaard.

Storingsafhankelijk onderhoud resulteert uitsluitend in correctief onderhoud. Dit houdt in dat de storingsconsequenties volledig worden aanvaard.

Gebruiksduurafhankelijk onderhoud leidt tot preventief onderhoud en tot correctief onderhoud als gevolg van de storingen die alsnog optreden. De kosten van preventief onderhoud zijn afhankelijk van de lengte van het interval van reparatie: hoe langer dit interval, hoe lager de kosten.

De kosten van correctief onderhoud zijn van hetzelfde interval afhankelijk. Nu geldt echter: hoe langer het interval, des te meer storingen alsnog optreden en des te hoger de hiermee gepaard gaande kosten. De elementaire efficiency van gebruiksduurafhankelijk onderhoud wordt dus bepaald door het interval van reparatie.

Toestandsafhankelijk onderhoud resulteert eveneens in preventief en correctief onderhoud. Preventief onderhoud bestaat uit inspecties en reparaties indien de afkeurnorm blijkt gepasseerd te zijn. Gegeven deze afkeurnorm, zijn de kosten van inspectie hoger naargelang het interval van inspectie korter is. Daar staat tegenover dat het aantal storingen vermindert en de kosten van correctief onderhoud lager zullen zijn. In pricipie kan in deze afweging ook de vaststelling van de afkeurnorm worden meegenomen. Hoe hoger deze norm boven de fatale waarde van de karakteristieke eigenschap ligt, des te geringer het aantal storingen, maar des te frequenter er preventief dient te worden gerepareerd.

De elementaire efficiency van toestandsafhankelijk onderhoud is dus afhankelijk van het interval van inspectie en de afkeurnorm.

De *combinatorische efficiency* richt zich op de afweging van de reductie in kosten te verwezenlijken door gelijktijdige activering van de behoefte aan operaties en de kosten inherent aan de benodigde verkorting van intervallen ten einde deze gelijktijdigheid te bewerkstelligen.

Voor operaties die set-ups zoals demontage en montage activiteiten gemeen hebben, resulteert een simultane uitvoering namelijk in een verlaging van het aantal malen dat deze set-ups moeten worden uitgevoerd. Gelijktijdige uitvoering kan in de beheersing als onderdeel van de planning worden gerealiseerd. Er kan ook al in het concept op worden vooruitgelopen om zodoende de beheersing te ontlasten. Combinatorische efficiency legt dan beperkingen op aan de intervallen waarmee operaties met gemeenschappelijke set-ups worden voorgeschreven.

Het verdisconteren van elementaire en combinatorische efficiency garandeert niet dat een verzameling regels voor het technisch systeem als geheel voldoet aan de eisen die vanuit het oogpunt van efficiency worden gesteld.

De *ultieme efficiency* richt zich dan ook op de afweging van de reductie in kosten bewerkstelligd door een verzameling onderhoudsregels als geheel en de kosten die met de uitvoering van het onderhoud, zoals voorgeschreven door deze regels, gaan gepaard.

– Randvoorwaarden

De randvoorwaarden waaraan de regels in een concept moeten voldoen vloeien voort uit de afspraken over de veiligheid en de inzetbaarheid van het technisch systeem, uit de ter beschikking gestelde onderhoudsmiddelen en uit de wensen

van de onderhoudsbeheersing met betrekking tot regelmaat in de vraag naar onderhoud van dit systeem.

De *veiligheid van een technisch systeem* kan voor bijvoorbeeld overheidsinstanties en verzekeringsmaatschappijen aanleiding zijn om *onderhoudsvorschriften* te formuleren die voor het bedrijf bindend zijn. Deze voorschriften moeten onverkort in het concept worden opgenomen.

Minder stringent is het voorschrijven van betrouwbaarheden waarmee bepaalde functies van een technisch systeem moeten worden vervuld. Deze randvoorwaarde specificeert storingen van het technische systeem die in ieder geval in het ontwerpproces verdisconteerd moeten worden, sluit storingsafhankelijk onderhoud als wijze van onderhoudsinitiatie uit, en domineert tenslotte in de bepaling van het interval waarmee de behoefte aan onderhoudsoperaties in kwestie wordt geactiveerd.

De *inzetbaarheid van een technisch systeem* in het productieproces resulteert allereerst in een voorkeur voor preventief onderhoud. Preventief onderhoud reduceert namelijk het aantal storingen en daarmee het aantal onverwachte onderbrekingen van het productieproces. Voor het concept impliceert dit een voorkeur voor gebruiksduurafhankelijk dan wel toestandsafhankelijk onderhoud. Preventief onderhoud biedt daarenboven de mogelijkheid tot uitvoering tijdens perioden dat het technische systeem toch niet benodigd is voor productie.

Dit betreft de 'timing' van de onderhoudsuitvoering en is dus in principe een beheersingsprobleem. In specifieke gevallen kan in het concept op dit probleem worden geanticipeerd. Gezien het inleidende karakter van dit artikel wordt hier niet op ingegaan.

De *beschikbaarheid van onderhoudsmiddelen* heeft betrekking op zowel het volume als het type middelen. Het volume van de middelen heeft repercussies op de 'timing' van de toewijzing van middelen aan operaties en is derhalve een beheersingsprobleem. Ook op dit probleem kan het concept in specifieke gevallen vooruitlopen. Wederom valt dit echter buiten het bestek van dit artikel.

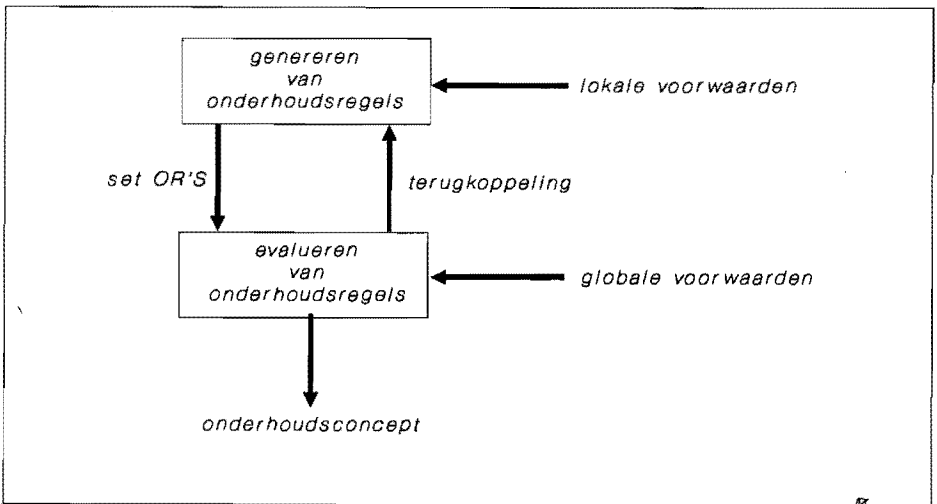
Het type middelen bepaalt direct de operaties die in het concept kunnen worden opgenomen. Het heeft immers geen zin operaties voor te schrijven die middelen behoeven die niet ter beschikking staan of niet door uitbesteding kunnen worden verkregen.

De *beheersbaarheid van onderhoud* wordt in hoge mate bepaald door de regelmaat in de vraag naar onderhoud van een technisch systeem. Het realiseren van regelmaat resulteert allereerst in een voorkeur voor preventief onderhoud aangezien dit onderhoud het onverwacht optredende correctief onderhoud terugdringt. De beheersbaarheid van het preventief onderhoud zelf wordt, gegeven de gebruiksintensiteit, bepaald door de onderliggende behoefte. De beheersing kan

eisen dat deze behoefte slechts op equidistante gebruiksmomenten optreedt. De samenstelling van de behoefte op zo'n moment is niet aan beperkingen onderworpen. Deze eis houdt in dat de uiteindelijke intervallen in het concept veelvouden van elkaar zijn. Stringenter is de eis dat de behoefte bestaat uit gespecificeerde verzamelingen onderhouds-operaties, die op equidistante gebruiksmomenten optreden. Na uitvoering van de laatste verzameling komt de eerste weer aan bod. Deze eis houdt in dat de behoefte volledig in het concept wordt vastgelegd.

4. Kader

Een kader voor het ontwerpen van onderhoudsconcepten geeft de stappen weer die moeten worden doorlopen om te komen tot een verzameling regels die voldoet aan de gestelde eisen. Deze eisen hebben enerzijds betrekking op individuele regels (specifieke eisen), anderzijds op de verzameling regels als geheel (generale eisen).



Figuur 6. De fasen in het ontwerpproces

In het ontwerpproces worden dan ook twee fasen onderscheiden (figuur 6):

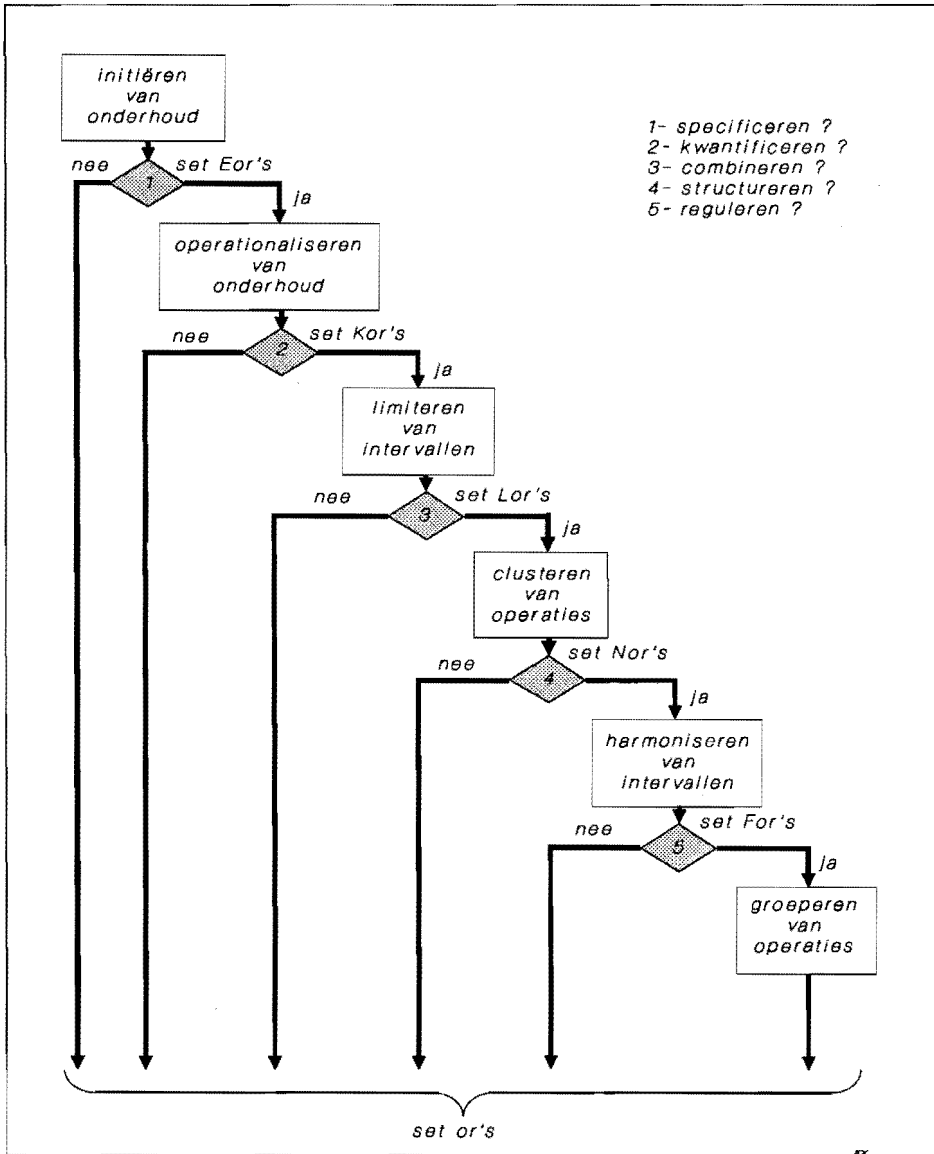
- het genereren van onderhoudsregels, en
- het evalueren van onderhoudsregels.

- *Het genereren van onderhoudsregels*

Het genereren van onderhoudsregels is de ontwerpfase waarin een verzameling regels wordt bepaald die voldoet aan de specifieke eisen. Specifieke eisen kunnen per onderhoudsregel worden verdisconteerd. Ze hebben in essentie betrekking op de potentiële en technische effectiviteit, op de elementaire en combinatorische efficiency en op de activering en samenstelling van de behoefte.

In het genereren van onderhoudsregels wordt dan ook een zestal stappen onderkend waarbij in elke stap het honoreren van één eis centraal staat (figuur 7):

- het initiëren van onderhoud,
- het operationaliseren van onderhoud,
- het limiteren van onderhoudsintervallen,
- het clusteren van onderhoudsoperaties,
- het structureren van onderhoudsintervallen, en
- het groeperen van onderhoudsoperaties.

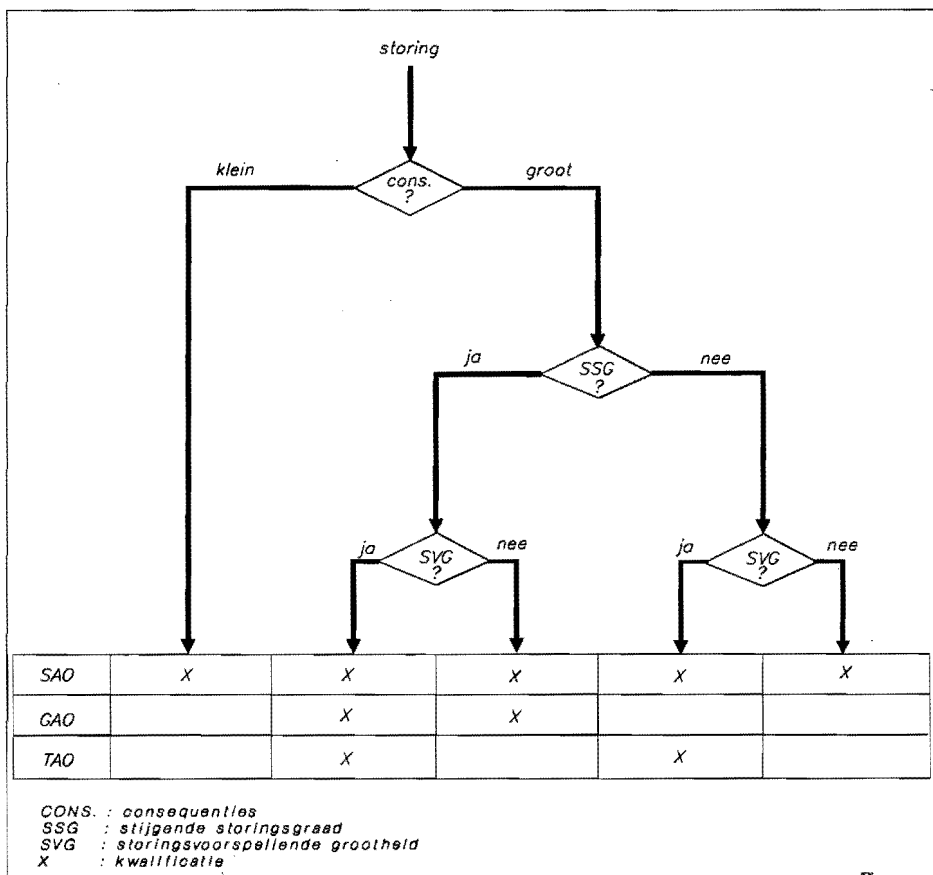


Figuur 7. De stappen in het genereren van onderhoudsregels

Het initiëren van onderhoud

Het initiëren van onderhoud beoogt voor iedere onderscheiden storing van het technische systeem te bepalen hoe onderhoud in gang wordt gezet. In deze stap staat de potentiële effectiviteit centraal.

De mogelijke categorieën van initiëring worden dan ook bepaald op grond van het storingsgedrag (figuur 8).



Figuur 8. De mogelijke categorieën van onderhoudsinitiering

Het selecteren van de uiteindelijke categorie geschiedt op basis van efficiency overwegingen. Hierin worden de storingsconsequenties (storingsafhankelijk onderhoud), de variantie van de kansdichtheidsfunctie (gebruiksduurafhankelijk onderhoud) en de directheid van de karakteristieke eigenschap (toestandsafhankelijk onderhoud) meegenomen. Voorts dient in deze keuze te worden verdisconteerd, dat de veiligheidseisen storingsafhankelijk onderhoud uitsluiten, en dat inzetbaarheids- en beheersingseisen zich manifesteren in een voorkeur voor gebruiksduurafhankelijk dan wel toestandsafhankelijk onderhoud.

Het initiëren van onderhoud resulteert in een verzameling elementaire onderhoudsregels.

Een *elementaire onderhoudsregel* schrijft een wijze van onderhoudsinitiëring voor. Blijkt voor een storing geen acceptabele wijze van initiëring te bestaan dan is nadere analyse van het storingsgedrag nodig of zullen oplossingen buiten het onderhoudsconcept moeten worden gevonden, zoals modificatie van het systeem en het aanpassen van de gebruiksomstandigheden.

De volgende stappen in het genereren van onderhoudsregels hebben betrekking op het *specificeren* van operaties en van de wijze van activering van de behoefte aan deze operaties. Voor de elementaire onderhoudsregels die behoren tot de categorie storingsafhankelijk onderhoud geldt dat het optreden van de storing de behoefte activeert.

In dit artikel wordt voorts aangenomen dat deze behoefte pas ná diagnose van de fysieke storingsgevolgen wordt gedetailleerd. Deze elementaire regels behoeven dus geen specificatie en worden rechtstreeks in de uiteindelijke verzameling onderhoudsregels opgenomen alwaar ze resulteren in *autonoom onderhoud*.

De gebruiksduurafhankelijke en toestandsafhankelijke onderhoudsregels vormen de basis voor de volgende ontwerpstep, waar in de uit te voeren onderhoudsoperaties aan de orde worden gesteld.

Het operationaliseren van onderhoud

Het operationaliseren van onderhoud beoogt onderhoudsoperaties vast te leggen. Het betreft reparatie (gebruiksduurafhankelijk onderhoud) en inspectie/reparatie (toestandsafhankelijk onderhoud). Het bepalen van effectieve operaties is een technische aangelegenheid die specifieke kennis van het fysieke storingsgedrag en van onderhoudstechnologieën vereist.

Het operationaliseren wordt beperkt door: de onderhoudsvorschriften die de uit te voeren operaties volledig vastleggen en door de ter beschikking staande middelen. Efficiency overwegingen, in de vorm van werklast en benodigd materiaal, spelen een rol bij de keuze uit mogelijke alternatieven.

Het operationaliseren van onderhoud resulteert in een verzameling rudimentaire onderhoudsregels. Een *rudimentaire onderhoudsregel* schrijft een operatie voor en de wijze van initiëring.

Het genereringsproces richt zich vervolgens op het *kwantificeren* van de activering van de behoefte aan onderhoud. Voor rudimentaire onderhoudsregels die veel stilstand en/of omvangrijke set-up activiteiten met zich meebrengen, kan het vanuit efficiency oogpunt aantrekkelijk zijn de voorgeschreven operaties uit te voeren telkens wanneer de gelegenheid zich voordoet. De keerzijde van de medaille is dat activering van de vraag met alle administratieve rompslomp puur

een beheersings-probleem wordt. De regels in kwestie worden rechtstreeks in de uiteindelijke verzameling regels opgenomen en leiden tot *opportunistisch onderhoud*.

De resterende rudimentaire regels vormen de input voor het limiteren van onderhoudsintervallen, de volgende ontwerpstep.

Het limiteren van onderhoudsintervallen

Het limiteren van onderhoudsintervallen beoogt maximale intervallen te bepalen. De nadruk ligt hierbij op de elementaire efficiency van onderhoud.

Het limiteren van het interval van reparatie (gebruiksduurafhankelijk onderhoud) vereist statistische analyse van het storingsgedrag. Het interval van inspectie (toestandsafhankelijk onderhoud) noopt tot studie van de relatie tussen storingsgedrag en verloop van de karakteristieke eigenschap. Veiligheidseisen leggen maximale intervallen dwingend op.

Het resultaat van deze stap is een verzameling normatieve onderhoudsregels. Een *normatieve onderhoudsregel* schrijft een onderhoudsoperatie voor en het maximale interval waarmee de behoefte aan deze operatie kan worden geactiveerd.

De volgende stappen in het genereren van onderhoudsregels betreffen het *combineren* van regels. Dit leidt tot activering van de behoefte aan onderhoud op vaste momenten ongeacht het optreden van de onderliggende storingen.

Voor normatieve regels die operaties voorschrijven, waarvan de uitvoering met hoge kosten gaat gepaard, kan het vanuit efficiency oogpunt aantrekkelijk zijn om het storingsgedrag wel mee te nemen. Na een storing start het interval immers opnieuw. De inspanning om deze regels individueel te volgen wordt op de koop toe genomen. De normatieve regels in kwestie worden rechtstreeks in de uiteindelijke verzameling onderhoudsregels opgenomen alwaar ze resulteren in *sequentieel onderhoud*.

De resterende regels vormen de basis voor het clusteren van onderhoudsoperaties waarin de economische afhankelijkheid tussen regels aan de orde wordt gesteld.

Het clusteren van onderhoudsoperaties

Het clusteren van onderhoudsoperaties beoogt individuele operaties tot clusters samen te voegen. Een *onderhoudscluster* is een verzameling operaties met een gemeenschappelijke set-up. Deze stap richt zich op het verdisconteren van de combinatorische efficiency van onderhoud.

De verzameling normatieve onderhoudsregels wordt opgesplitst in deelverzamelingen regels, die operaties voorschrijven met gemeenschappelijke set-ups. Voor iedere deelverzameling worden in principe de mogelijke combinaties van operaties economisch gewaardeerd en het aantrekkelijkste alternatief gekozen.

Het resultaat van deze stap is een verzameling cumulatieve onderhoudsregels. Een *cumulatieve onderhoudsregel* schrijft een onderhoudsoperatie dan wel onderhoudscluster voor en het maximale interval waarmee de behoefte aan deze operatie/cluster kan worden geactiveerd.

In de volgende stappen van het genereren van onderhoudsregels richt de aandacht zich op het *proportioneren* van de behoefte aan onderhoud. Het oogmerk is de complexiteit van de beheersing terug te dringen door vergroting van de regelmaat in de behoefte aan onderhoud. De cumulatieve onderhoudsregels die niet aan beheersingseisen zijn onderworpen, worden rechtstreeks in de uiteindelijke set onderhoudsregels opgenomen en leiden tot *variabel onderhoud*.

De overige cumulatieve onderhoudsregels vormen de input voor het structureren van onderhoudsintervallen.

Het structureren van onderhoudsintervallen

Het structureren van onderhoudsintervallen beoogt de intervallen zoals voorgeschreven door de cumulatieve regels efficiënt onder te brengen in toegestane intervallen. Deze intervallen zijn veelvoud van een basisinterval, de periode. Indien de periode volledig is vastgelegd door de beheersingseis dan komt structureren neer op het verkorten van ieder voorgeschreven interval tot de lengte van het passende, toegestane interval. Is er daarentegen nog enige speelruimte dan moet het structureren resulteren in een periodiciteit waarbij het verlies aan potentiële eenheden van gebruik acceptabel is.

Het structureren resulteert in een verzameling harmonische onderhoudsregels. Een *harmonische onderhoudsregel* schrijft een onderhoudspakket voor en het interval waarmee de behoefte aan dit pakket geactiveerd wordt. Een *onderhoudspakket* is een verzameling onderhoudsoperaties en onderhoudsclusters met een gemeenschappelijk interval.

De laatste stap in het genereren van onderhoudsregels betreft het *reguleren* van de behoefte aan onderhoud. De harmonische onderhoudsregels die onderhoud voorschrijven dat niet aan inhoudelijke eisen onderworpen is, worden in de uiteindelijke verzameling onderhoudsregels opgenomen en resulteren in *periodiek onderhoud*. De resterende regels vormen de basis voor de laatste stap, het groeperen van onderhoudsoperaties.

Het groeperen van onderhoudsoperaties

Het groeperen van onderhoudsoperaties beoogt de onderhoudsoperaties zoals voorgeschreven door de formatieve regels efficiënt tot beurten samen te stellen. Een *onderhoudsbeurt* is een verzameling onderhoudsoperaties die als een entiteit wordt geactiveerd. Indien de beheersingseis het aantal toegestane beurten voorschrijft dan komt het groeperen van onderhoudsoperaties neer op het efficiënt onderbrengen van operaties in deze beurten. Staat de beheersingseis daarentegen nog enige speelruimte in het aantal beurten toe dan moet het groeperen resulteren in een efficiënte beurtencyclus. Hierbij dient de lengte van de cyclus te worden afgewogen tegen het verlies aan potentiële eenheden van gebruik, dat inherent is aan het onderbrengen van de voorgeschreven operaties in deze cyclus.

Het groeperen van onderhoudsoperaties resulteert in een set cumulatieve onderhoudsregels. Een *cyclische onderhoudsregel* schrijft een onderhoudsbeurt voor en het gebruiksmoment waarop de behoefte aan die beurt geactiveerd wordt. De cyclische onderhoudsregels worden opgenomen in de uiteindelijke verzameling regels, alwaar ze resulteren in *cyclisch onderhoud*.

– *Het evalueren van onderhoudsregels*

Het evalueren van onderhoudsregels is de ontwerpfase waarin een gegeneerde verzameling onderhoudsregels wordt getoetst aan de generale eisen die bepalen of die verzameling acceptabel is als onderhoudsconcept. Deze eisen hebben betrekking op de kosten die met de verzameling gepaard gaan, op de hoeveelheid preventief onderhoud en op de samenstelling van dit preventieve onderhoud.

In het evalueren van onderhoudsregels worden dan ook drie stappen onderscheiden (figuur 9):

- het waarderen van de verzameling regels,
- het karakteriseren van de vraag, en
- het classificeren van preventief onderhoud.

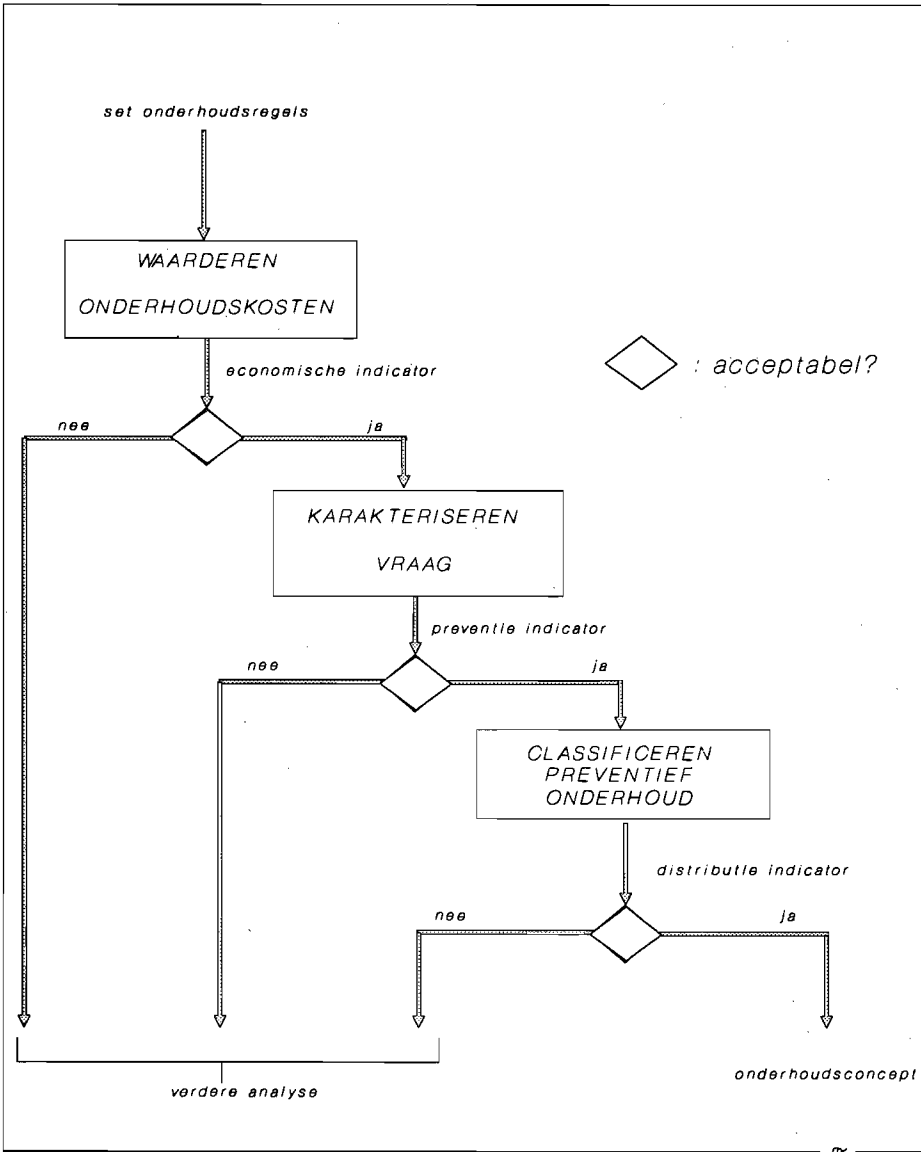
Het *waarderen van de verzameling regels* beziet de kosten van het voorgeschreven onderhoud in het licht van de bereikte reductie in storingsconsequenties.

Het *karakteriseren van de vraag* naar onderhoud betreft de prestatie van de verzameling onderhoudsregels vis à vis de inzetbaarheids- en beheersingseisen. Deze stap komt in essentie neer op het bepalen van de hoeveelheid preventief onderhoud.

Het *classificeren van preventief onderhoud* richt zich op de regelmaat in de behoefte aan preventief onderhoud. Deze eis betreft de samenstelling van preventief onderhoud waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen opportunistisch, sequentieel, variabel, periodiek en cyclisch onderhoud.

Een gegeneerde verzameling onderhoudsregels die aan de gestelde normen voldoet, vormt het onderhoudsconcept van het technische systeem. Wordt niet aan de normen voldaan dan is nadere analyse van de onderhoudsregels geboden. Deze analyse moet mogelijkheden tot verbetering identificeren. Deze informatie wordt naar de fase van het genereren van onderhoudsregels teruggekoppeld, ten einde met een verbeterde verzameling regels op de proppen te komen. Die verzameling regels wordt vervolgens geëvalueerd, enzovoorts, enzovoorts.

Het is natuurlijk ook mogelijk dat oplossingen buiten de directe onderhoudssfeer moeten worden gezocht zoals modificatie van het technische systeem,verruiming van de beschikbare middelen.



Figuur 9. De stappen in het evalueren van onderhoudsregels

5. Slotopmerkingen

Het gepresenteerde kader voor het ontwerpen van onderhoudsconcepten is gebaseerd op een groot aantal onderzoeken waarin inzichten op deelreinen in de praktijk op bruikbaarheid zijn getoetst. Het kader als geheel is nu in een drietal

gevallen toegepast waarbij de nadruk lag op het genereren van onderhoudsregels (Maas⁷, Lambooy⁸, Gaag⁹).

In alle gevallen bleek de aanwezige informatie over het storingsgedrag onvoldoende en moest dan ook gebruik worden gemaakt van schattingen van experts. De gegenereerde verzamelingen weken desondanks aanmerkelijk af van de gehanteerde onderhoudsregels. Het evalueren van onderhoudsregels werd aan het management overgelaten. In één geval werd besloten de gegenereerde verzameling onverkort als concept in te voeren. Dit had zoveel succes dat al snel concepten voor de essentiële technische systemen werden ontworpen.

In het tweede geval heeft men enige tijd gearzeld, maar daar wordt nu ook druk gewerkt aan de verdere invoering van concepten.

In het derde geval tenslotte bleef men sceptisch tegen het resultaat aankijken. Technisch geïntereerd onderzoek werd noodzakelijk geacht vooraleer men verdere beslissingen neemt.

Momenteel spitst het praktijkgerichte onderzoek zich toe op de informatisering van het concept en het gebruik van 'software tools' in het ontwerpproces. Verder theoretisch onderzoek is nodig om het kader uit te breiden tot technische systemen met een complexe structuur, die leidt tot functionele en fysieke afhankelijkheden tussen onderhoudsregels. Het betreft zaken zoals verborgen storingen, meervoudige storingen en modularisatie.

Tenslotte dient opgemerkt te worden dat in dit inleidende artikel voorbij is gegaan aan een aantal zaken die de bewerkelijkheid van het ontwerpproces verhogen, de principes echter onverlet laten. Voorbeelden zijn het onderscheiden van tijdens- en buiten bedrijf onderhoud, van verschillende gebruiks-dimensies en van onderhoudsechelons. Ook is geen aandacht besteed aan specifieke ontwerp-situaties waarin de onderhoudsbeheersing resulteert in het stellen van stringenter eisen aan het concept. Te denken valt aan enkelvoudige technische systemen die periodiek in het productieproces worden ingezet en aan groepen identieke technische systemen waarbij er meer aanwezig zijn dan strikt noodzakelijk is voor vervulling van de produktiefunctie.

B. Onderhoudsbeheersing

Onderhoudsbeheersing omvat in essentie het op zodanige wijze afstemmen van onderhouds-vraag en onderhouds-aanbod dat aan de beoogde doelstellingen en randvoorwaarden wordt voldaan. Dit afstemmingsprobleem wordt gekenmerkt door complexiteit en onzekerheid. Deze karakteristieken resulteren in een hiërarchieke beslissingsstructuur die primair gericht is op een stapsgewijze verfijning van de beheersing van de werkstroom.

Voortgangsbewaking en terugkoppeling zijn hierbij essentieel om snel te kunnen reageren op nieuwe informatie die tijdens de uitvoering van het onderhoud naar voren komt.

Conclusies en voorstellen voor verder onderzoek worden geformuleerd.

1. Inleiding

In veel industriële organisaties die eindprodukten leveren is de wijze van produceren de afgelopen jaren drastisch veranderd. Was eerst de aandacht primair gericht op het verhogen van de efficiency door interne specialisatie en schaalvergroting, heden ten dage streeft men onder druk van de markt naar flexibiliteit, leverbetrouwbaarheid en kwaliteit. Dit streven stelt onder meer hoge eisen aan de produktiemiddelen en dus aan het onderhoud van deze middelen.

De leveranciers van onderdelen en halffabricaten zijn minder afhankelijk van de grillen van de markt. Verhoging van de efficiency blijft vooralsnog dominant. Binnen het primaire proces raken de mogelijkheden hiertoe echter langzaam maar zeker uitgeput. Meer en meer worden dan ook secundaire processen zoals onderhoud onder de loep genomen.

Deze toenemende belangstelling voor onderhoud heeft niet geresulteerd in een systematische benadering van de onderhoudsbeheersing. In de huidige gang van zaken staat nog steeds het inplannen van veel werk centraal. Op deze wijze wordt getracht de hoge bezettingsgraad van de onderhoudscapaciteiten te realiseren die door het hogere management zo op prijs wordt gesteld. De keerzijde van de medaille is dat het spoedwerk ófwel lange en onbetrouwbare doorlooptijden kent, ofwel dat de planning voortdurend wordt verstoord. De uiteindelijke beheersbaarheid van de uitvoering van het totale werkpakket is in ieder geval onvoldoende. Vaak wordt, indachtig de mogelijkheden van de computer, getracht dit beheersingsprobleem op te lossen door verbetering van de informatievoorziening. De resultaten van deze pogingen zijn veelal teleurstellend te noemen.

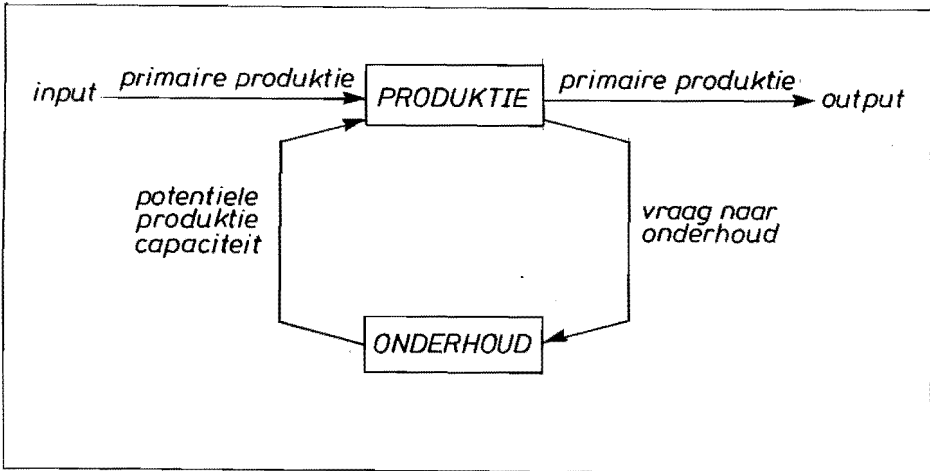
Productiebeheersing kent een analoog afstemmingsprobleem dat reeds langer in het middelpunt van de belangstelling staat⁴ Ook hier werd, in eerste in eerste instantie, de oplossing gezocht in het verbeteren van de informatievoorziening^{10en11}. De vele problemen die zich hierbij in de praktijk voordoen geven aan dat het wenselijk is om allereerst de structuur van de productiebeheersing in zijn totaliteit opnieuw aan de orde te stellen¹².

Aansluitend bij deze gedachtengang beoogt dit artikel een eerste aanzet te geven tot het structureren van de onderhoudsbeheersing. Om niet opnieuw 'het wiel uit te vinden' zal, waar mogelijk, gebruik worden gemaakt van inzichten verkregen in de productiebeheersing.

In paragraaf 2 wordt onderhoud gedefinieerd. Het afstemmen van de vraag naar en het aanbod aan onderhoud wordt in paragraaf 3 gekarakteriseerd. De voorgestelde basisstructuur voor de beheersing in paragraaf 4, heeft als elementen een drietal beslissingsniveaus: strategische planning in paragraaf 5; management-eheersing in paragraaf 6, en operationele beheersing in paragraaf 7. Tenslotte worden in paragraaf 8 enige afrondende opmerkingen gemaakt.

2. Onderhoud

Onderhoud in een industriële organisatie (zie figuur 10) ondersteunt het productieproces waarin de primaire productie-*input* (materiaal, energie en mankracht) omgezet wordt in de primaire productie-*output* (het gewenste product). Bij deze transformatie wordt gebruik gemaakt van technische systemen.



Figuur 10. De relatie tussen productie en onderhoud

Een *technisch systeem* is een verzameling fysieke elementen met een specificerbare functie, die vanuit onderhouds-oogpunt als een entiteit wordt beschouwd. De *staat* van een technisch systeem is de gesteldheid van de eigenschappen van het systeem, die relevant worden geacht voor vervulling van zijn functie.

Externe factoren, veroudering en gebruik van de technische systemen in het productieproces zijn er debet aan, dat de staat van deze systemen achteruitgaat. Dit leidt onvermijdelijk tot een secundaire productie-*output*: vraag naar onderhoud. De uitvoering van onderhoud resulteert in een secundaire productie-*input*: potentiële productiecapaciteit.

In deze visie is onderhoud: het geheel van activiteiten dat ten doel heeft de technische systemen in de staat te houden of weer terug te brengen, die nodig wordt geacht voor vervulling van de productiefunctie.

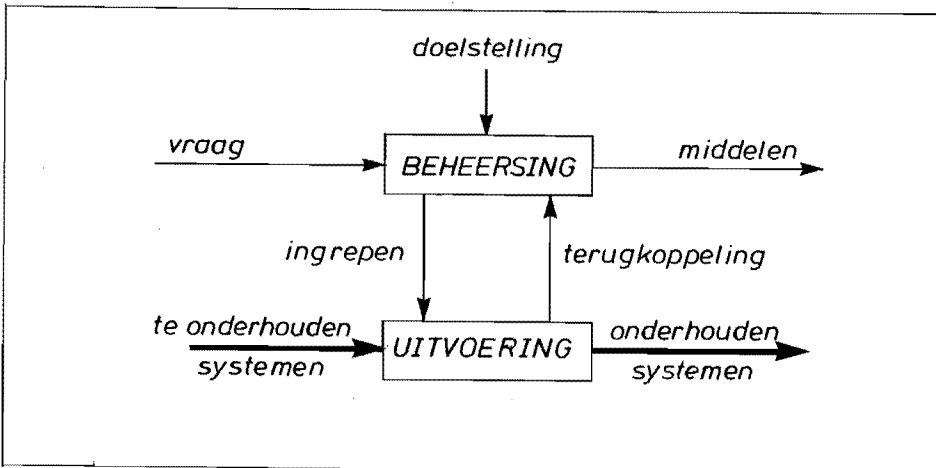
46
~

In deze definitie correspondeert 'in de staat terugbrengen' met *correctief onderhoud*, en 'in de staat houden' met *preventief onderhoud*.

Er is sprake van een *storing*, als een technisch systeem zich niet meer bevindt in de nodig geachte staat.

3. Onderhoudsbeheersing

Onderhoudsbeheersing, zie figuur 11, omvat in essentie alle beslissingen die betrekking hebben op het in de tijd afstemmen van het aanbod aan onderhoudsmiddelen op de vraag naar uitvoering van onderhoudsoperaties waarbij deze middelen nodig zijn. Dit afstemmen dient zodanig te gebeuren dat aan de doelstellingen wordt voldaan.



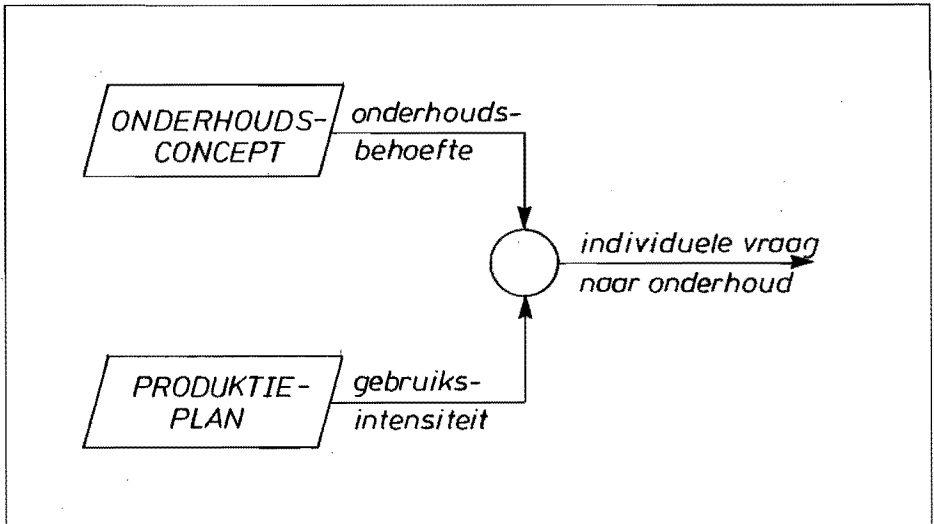
Figuur 11. Operationele onderhoudsbeheersing

- Vraag naar onderhoud

De vraag naar onderhoud is afkomstig van de technische systemen in gebruik in het bedrijf. Deze systemen vormen een gesloten groep die vooraf bekend is. De vraag naar onderhoud is dan ook de superpositie van de vraag naar onderhoud van de individuele technische systemen.

Deze individuele vraag, zie figuur 12, is het resultaat van de gebruiksintensiteit en de onderhoudsbehoefte van het technisch systeem.

↓ 61



Figuur 12. De individuele vraag naar onderhoud

De gebruiksintensiteit geeft het gemiddeld gebruik per tijdseenheid weer. Deze grootte vloeit voort uit het productieplan, waarin de toekomstige inzet van het systeem in het productieproces is gespecificeerd. De onderhoudsbehoefte geeft de onderhouds-operaties weer en het gebruiksmoment waarop uitvoering van die operaties wordt geactiveerd.

De onderhoudsbehoefte vloeit voort uit het onderhouds-concept. Het onderhouds-concept van een technisch systeem is het geordende stelsel regels, dat voorschrijft welke operaties moeten worden uitgevoerd en hoe deze behoefte aan operaties wordt geactiveerd¹³.

Naar de wijze van activering kunnen in een concept drie categorieën regels worden onderscheiden:

- storingsafhankelijk onderhoud
- gebruiksduurafhankelijk onderhoud en
- toestandsafhankelijk onderhoud.

Storingsafhankelijk onderhoud schrijft activering van de behoefte aan onderhoud voor door het optreden van de storing.

De behoefte aan onderhoud bestaat uit diagnose om de storing te zoeken gevolgd door reparatie om deze op te heffen.

Storingsafhankelijk onderhoud resulteert in een vraag die uitsluitend bestaat uit correctief onderhoud.

Gebruiksduurafhankelijk onderhoud schrijft activering van de behoefte aan een gespecificeerde reparatie voor door het verstrijken van een gespecificeerde gebruiksduur. Gebruiksduur-afhankelijk onderhoud resulteert in een vraag die

bestaat uit preventief onderhoud en uit correctief onderhoud voor de storingen die alsnog optreden.

Toestandsafhankelijk onderhoud schrijft activering van de behoefte aan onderhoud voor door het bereiken van een gespecificeerde toestand. De behoefte aan onderhoud bestaat uit een inspectie om de actuele toestand van het technisch systeem vast te stellen en deze te vergelijken met een gespecificeerde 'afkeurnorm'. Is deze norm gepasseerd dan is reparatie noodzakelijk.

Toestandsafhankelijk onderhoud resulteert in een vraag naar onderhoud, die bestaat uit preventief onderhoud en uit correctief onderhoud voor de storingen die alsnog optreden.

De vraag naar correctief onderhoud treedt onverwachts op.

Over de inhoud valt dan nog niets met enige zekerheid te zeggen. Deze informatie is pas beschikbaar als de diagnose heeft plaatsgevonden. De verdere werkzaamheden zijn nu gespecificeerd en de benodigde middelen bekend.

Het optreden van de vraag naar preventief onderhoud is in principe voorspelbaar. Dit geldt ook voor de inhoud. Daarbij dient wel te worden aangetekend, dat informatie over de noodzaak tot uitvoering van de reparatie bij toestandsafhankelijk onderhoud pas beschikbaar komt nadat deze inspectie is uitgevoerd. Eerst dan is immers bekend, of de afkeurnorm, al dan niet, is overschreden.

Ook hier dus onzekerheid over daadwerkelijk benodigde middelen

– *Aanbod aan onderhoud*

Het aanbod aan onderhoud bestaat uit materialen en capaciteiten.

Materialen zijn de grondstoffen en onderdelen die nodig zijn voor het uitvoeren van reparaties. Aan de beheersing van het aanbod aan materialen, opgenomen in het voorraad-assortiment, wordt in bestek van dit artikel geen aandacht besteed^{14,15}. Het voorzien in materialen met een vraag die ruim van te voren bekend is vergt het tijdig genereren van bestelopdrachten.

Uitvoering van onderhoud waarbij materiaal nodig is dat niet aanwezig is zal moeten wachten tot het materiaal beschikbaar komt.

Capaciteiten zijn de personele vaardigheden, gereedschappen en faciliteiten, die bij het uitvoeren van een operatie aangewend worden maar na gebruik weer beschikbaar zijn voor volgende operaties. De capaciteiten kunnen organisatorisch ondergebracht worden in capaciteitsgroepen, die met het oog op de bezettingsgraad als een geheel worden beschouwd. In dit artikel wordt geen aandacht besteed aan de wijze, waarop het werk binnen zo'n groep aan individuele monteurs wordt toegewezen.

De beschikbaarheid van capaciteiten wordt bepaald door factoren als ziekteverzuim, verloop, verlof. Daarnaast speelt de capacitieve flexibiliteit een voornamelijk rol. Deze flexibiliteit kan betrekking hebben op het volume, op de mix, en op de inzet van de capaciteiten.

Volume flexibiliteit houdt in dat gedurende perioden de hoeveelheid van bepaalde typen capaciteit is te vergroten.

Deze flexibiliteit kan op verschillende manieren tot stand worden gebracht: uitbesteden van werk, inhuren van extra personeel, overwerken van medewerkers. Iedere vorm vereist zijn eigen voorbereidingstijd. De omvang per periode zal in de regel aan beperkingen onderworpen zijn. Volume flexibiliteit is in hoge mate bepalend voor de complexiteit van de beheersing. Bij een grote flexibiliteit wordt het vermogen van de onderhoudsfunctie om werk te verzetten namelijk bepaald door een klein aantal kritieke capaciteiten.

Een *kritieke capaciteit* wordt gekenmerkt door een hoge bezettingsgraad en een geringe volume flexibiliteit. Voor de andere, niet kritieke, capaciteiten mag er van uitgegaan worden dat de capaciteit kan worden aangepast aan de vraag.

Mix flexibiliteit is aanwezig, indien medewerkers meerdere vaardigheden beheersen, multi-inzetbaar zijn.

Het volume van een capaciteitsgroep kan nu worden vergroot onder gelijktijdige verkleining van het volume van een andere groep. Van mix flexibiliteit indien aanwezig kan op zeer korte termijn worden gebruik gemaakt, en kan dus dienen om de dagelijkse verstoring in de voortgang van het werk op te vangen.

Tenslotte is er sprake van *inzet flexibiliteit*, indien medewerkers bereid zijn buiten de normale bedrijfstijd te werken zo als 's nachts, in het weekeind of gedurende de bedrijfsvacantie. Deze vorm van flexibiliteit vereenvoudigt de coördinatie van produktie en onderhoud aangezien preventief onderhoud nu uitgevoerd kan worden zonder dat dit ten koste gaat van produktieve uren.

– Doelstelling

Gegeven de vraag naar en het aanbod aan onderhoudscapaciteiten is de doelstelling van de beheersing tweeledig.

Enerzijds dient gestreefd te worden naar minimale onderhoudskosten, anderzijds moet worden voldaan aan randvoorwaarden die primair van produktie afkomstig zijn.

Het streven naar minimale kosten vindt zijn oorsprong in het feit, dat deze kosten uiteindelijk deel uitmaken van de kostprijs van de gefabriceerde produkten. De onderhoudskosten bestaan uit een directe en indirecte component. De directe component omvat de kosten van de capaciteiten, die bij de uitvoering van het onderhoud worden ingezet. De indirecte component heeft voornamelijk betrek-

king op de kosten, die gepaard gaan met het niet beschikbaar zijn van de technische systemen voor produktieve doeleinden.

Indirect is ook de schade aan de omgeving van een technisch systeem die door een storing van dat systeem wordt veroorzaakt

De randvoorwaarden die betrekking hebben op de timing van de uitvoering van onderhoud, vloeien voort uit het feit, dat het belang van elk van deze activiteiten voor het produktieproces niet noodzakelijkerwijs hetzelfde is. De snelheid waarmee correctief onderhoud moet worden uitgevoerd wordt bepaald door de storingsconsequenties in termen van produktiederving en omgevingschade. Hoe ernstiger de consequenties, hoe urgenter het onderhoud.

De eisen gesteld aan de timing van preventief onderhoud van een technisch systeem zijn afhankelijk van de essentialiteit van het systeem voor het produktieproces. Een hogere essentialiteit gaat gepaard met stringentere eisen aan het ter beschikking van onderhoud stellen van het technische systeem.

Het tijdstip waarop preventief onderhoud wordt uitgevoerd kan ook door externe instanties worden opgelegd, bijvoorbeeld als het gaat om het uitvoeren van wettelijk voorgeschreven inspecties.

4. Onderhoudsbeheersingssysteem

Een onderhoudsbeheersingssysteem omvat alle beslissingen die betrekking hebben op het in de tijd afstemmen van de vraag naar en het aanbod aan onderhoud. Een beheersingssysteem voor onderhoud moet in de eerste plaats berekend zijn op de complexiteit van dit probleem. Deze complexiteit is het gevolg van het feit dat het effect van de beslissingen op de bedrijfsdoelstelling niet eenduidig is en dat de beslissingen elkaar over en weer beïnvloeden. Daarnaast vertoont de vraag naar onderhoud een grote mate van onzekerheid, die pas wordt weggenomen, tijdens de uitvoering van de onderhoudswerkzaamheden zelf. Een beheersingssysteem, dat aansluit bij deze karakteristieken zal dan ook meer zijn gericht op het verschaffen van inzicht in de gang van zaken op de werkvloer, dan op het toewijzen van toekomstige capaciteiten aan werkzaamheden.

Een dergelijk systeem bestaat uit een mix van de volgende vier elementen¹⁶:

- zelfstandige systemen
- speelruimte
- verticale informatiesystemen
- horizontale relaties.

Zelfstandige systemen zijn systemen die bij het nemen van beslissingen niet, of nauwelijks rekening behoeven te houden met andere systemen.

Speelruimte vergroot de beslissingsvrijheid en kan bijvoorbeeld worden geïntroduceerd in de vorm van het aanhouden van overcapaciteit, door het op korte termijn uitbreiden van capaciteiten en door het toestaan van lange doorlooptijden. *Verticale informatiesystemen* betreft beslissingsondersteunende systemen voor specifieke beslissingen.

Horizontale relaties tenslotte hebben betrekking op het afstemmen van onderscheiden systemen en het coördineren van de voortgang van de werkzaamheden.

Het structureren van de beheersing van onderhoud is gebaseerd op het scheppen van zelfstandige deelsystemen, in een woord : beslisfuncties en het beheersen van speelruimte.

De benodigde informatiesystemen, overleg- en onderhandelingsprocedures dienen binnen deze structuur ontwikkeld te worden. Deze aspecten worden in dit artikel echter buiten beschouwing gelaten.

Anthony¹⁷ onderscheidt in beheersingssystemen de volgende drie niveaus van besluitvorming (zie figuur 13):

- strategische planning
- management beheersing
- operationele beheersing.

Strategische planning is het besluitvormingsproces dat zich richt op het formuleren van de strategie waarin doelen en middelen zijn vastgelegd.

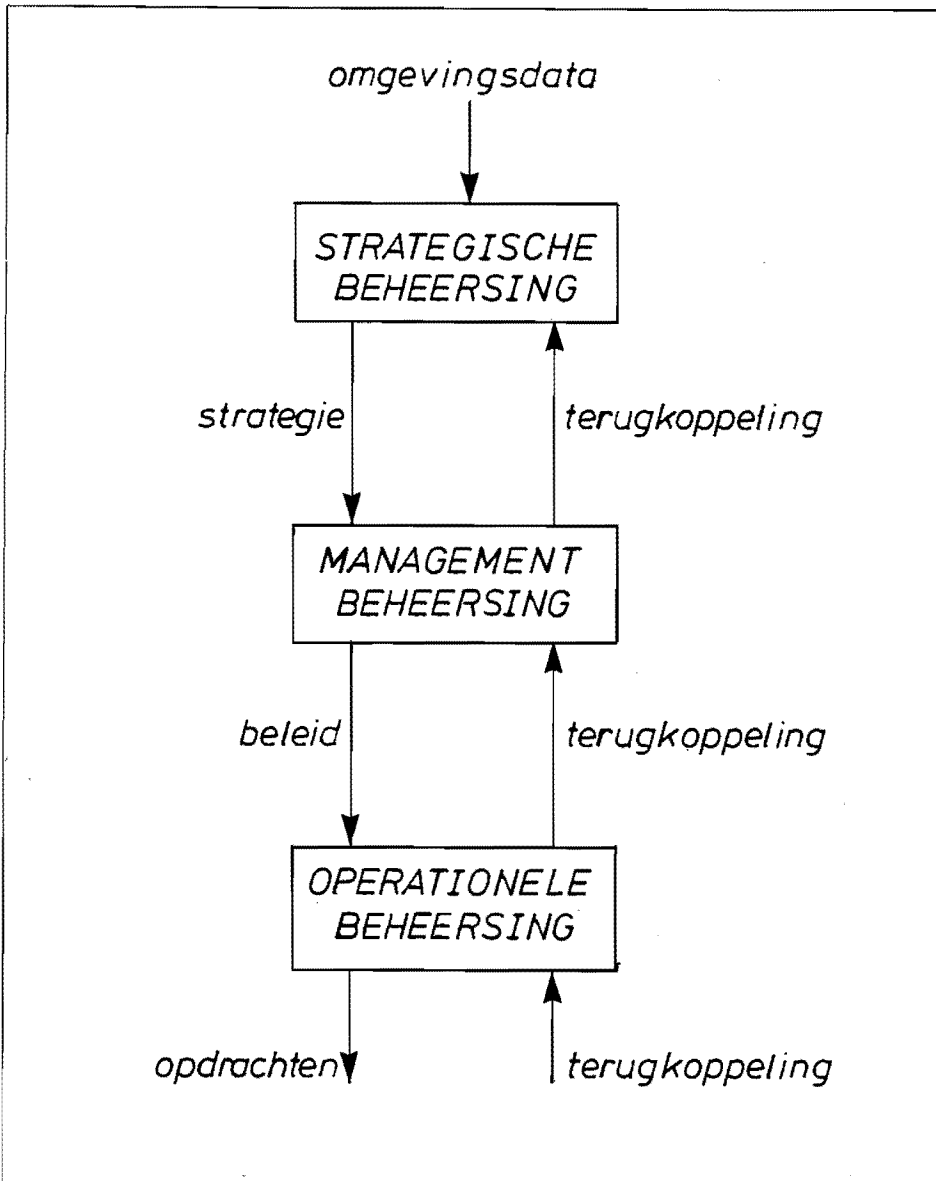
Management beheersing omvat alle beslissingen die zich bezig houden met het maken van beleid, dat betrekking heeft op het effectief en efficiënt gebruiken van de ter beschikking gestelde middelen.

Operationele beheersing tenslotte richt zich op het effectief en efficiënt uitvoeren van specifieke activiteiten.

5. Strategische onderhoudsplanung

Strategische onderhoudsplanung richt zich, gegeven de capaciteiten, op het formuleren van de doelstelling van het onderhoud. Deze doelstelling wordt afgeleid van de bedrijfsdoelstelling en van de wensen van produktie aangezien dit het primaire proces in het bedrijf is. Gegeven het aanbod aan onderhoudscapaciteiten wil het bedrijf dat deze capaciteiten zo efficiënt mogelijk worden gebruikt. Deze wens impliceert het realiseren van een hoge bezettingsgraad. Gegeven de vraag naar onderhoud wil produktie dat deze vraag snel en volgens afspraken wordt uitgevoerd. Deze wens impliceert het realiseren van onderhoudsdoorlooptijden die kort en betrouwbaar zijn.

Een hoge bezettingsgraad gaat echter vaak hand in hand met lange doorlooptijden, die tot overmaat van ramp ook nog eens onbetrouwbaar worden. Beide wensen zijn dus conflicterend.



Figuur 13. De drie niveaus van besluitvorming

Op bedrijfsniveau moet dan ook een bezettingsgraad van de onderhoudsmiddelen worden vastgesteld die in het licht van beide wensen acceptabel is. De realisering van deze norm bezettingsgraad, dat wil zeggen: niet hoger maar ook niet lager, is de centrale doelstelling voor de onderliggende beheersniveaus.

6. Management onderhoudsbeheersing

Management onderhoudsbeheersing betreft het bepalen van beladingsrestricties die voor het effectief en efficiënt gebruiken van de capaciteiten zorgdragen. Beladingsrestricties vormen de condities, waaronder met onderhoud realistische afspraken zijn te maken over de uitvoering van het werk.

Het effectief gebruiken van capaciteiten impliceert inzet conform de eisen van productie. Hierbij dient allereerst onderscheid te worden gemaakt tussen preventief en correctief onderhoud. De snelheid waarmee correctief onderhoud, vanuit het oogpunt van productie, moet worden uitgevoerd is afhankelijk van de storingsconsequenties. In dit artikel worden twee klassen onderscheiden: spoed en uitstelbaar onderhoud.

Spoed onderhoud vereist onmiddellijke en maximale inzet van capaciteiten. De uitvoering van *uitstelbaar onderhoud* kan zonder problemen enige tijd wachten.

Tot de daadwerkelijke uitvoering wordt besloten op grond van capaciteitsoverwegingen.

De invloed die productie op de timing van preventief onderhoud van een technisch systeem uitoefent is afhankelijk van de essentialiteit van het systeem. Ook hier worden twee klassen onderscheiden: geprogrammeerd en adaptief onderhoud.

Geprogrammeerd onderhoud vereist uitvoering binnen grenzen, die primair door productie worden opgelegd. *Adaptief onderhoud* kent slechts een uiterst uitvoeringstijdstip.

Het moment van daadwerkelijke uitvoering wordt bepaald door onderhoud op grond van capaciteitsoverwegingen, waarbij de beschikbaarheid van het technisch systeem voor onderhoud wordt getoetst.

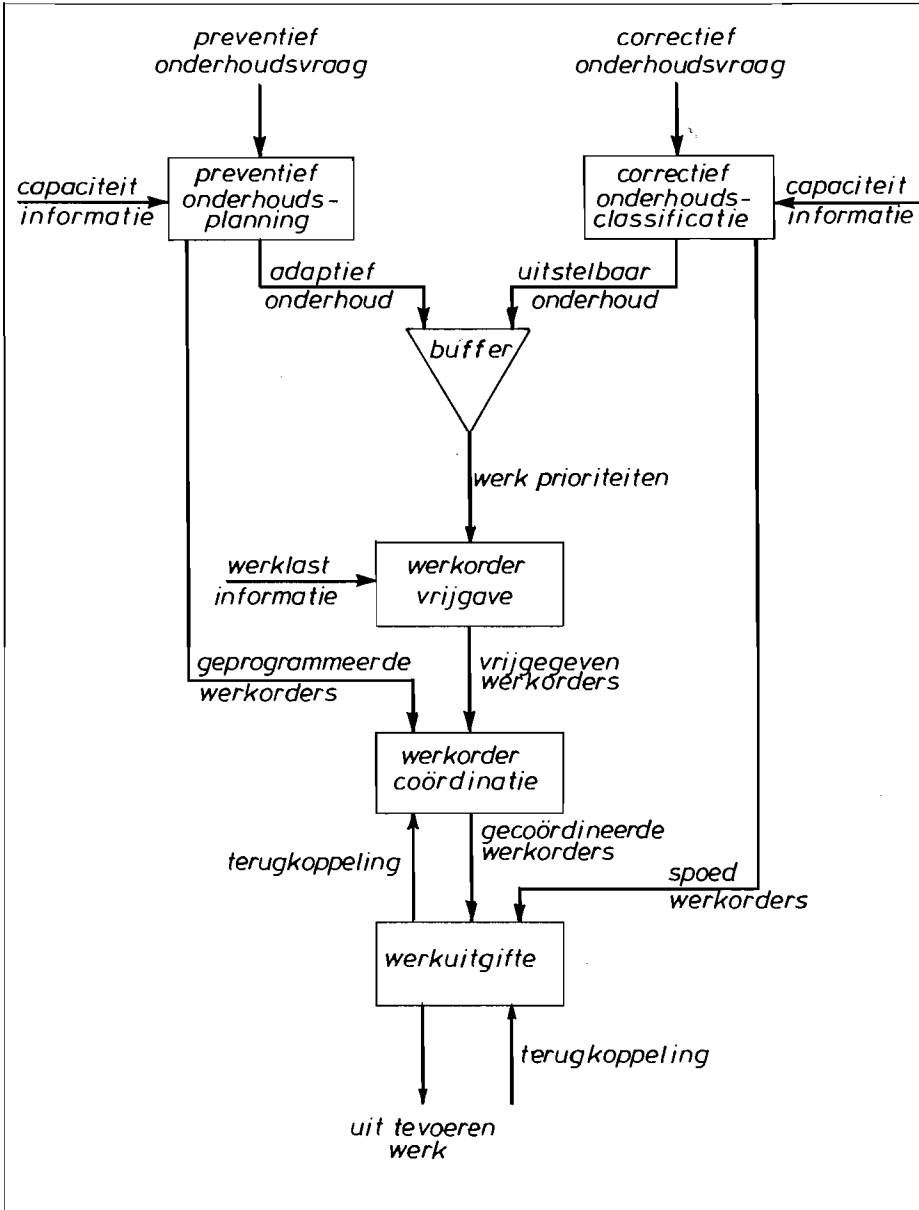
De efficiency van het gebruik van de capaciteiten resulteert allereerst in restricties in het toegestane capaciteitsbeslag, voor elk van de onderscheiden klassen. Hiermee wordt voorkomen dat deze klassen elkaar in de wielen rijden en het onderliggende besluitvormingsniveau met een onoplosbaar probleem wordt geconfronteerd. Voorts zullen restricties gelden voor de volume flexibiliteit van de capaciteiten. Ongelimiteerd overwerken en uitbesteden behoort in de regel niet tot de mogelijkheden. Tenslotte dient de hoeveelheid werk die onderhoud onder handen heeft aan banden worden gelegd. Op deze wijze wordt gepoogd de norm bezettingsgraad, die op strategisch niveau is genormeerd, te beheersen.

7. Operationele onderhoudsbeheersing

De operationele onderhoudsbeheersing richt zich op het effectief en efficiënt uitvoeren van daadwerkelijke operaties. Gegeven de doelstelling en de beladingsrestricties, richt de aandacht zich dus op het (op korte termijn) afstemmen van de vraag naar onderhoudscapaciteiten op het aanbod aan onderhoudscapaciteiten.

De voorgestelde structuur omvat de volgende vijf beslisfuncties (zie figuur 14)

- preventief onderhoudsplanung
- correctief onderhoudsclassificatie
- werkordervrijgave
- werkordercoördinatie
- werkuitgifte.



Figuur 14. Basisstructuur voor operationele beheersing

– *Preventief onderhoudsplanung*

De preventief onderhoudsplanung betreft de timing van de uitvoering van de vraag naar preventief onderhoud.

Deze vraag vloeit voort uit het gebruik van de technische systemen in het productieproces en uit de onderhoudsconcepten van deze systemen. Gegeven de vraag, moet de timing van de werkzaamheden zodanig zijn dat efficiënt wordt voldaan aan de wensen van productie, binnen de capacitieve mogelijkheden van onderhoud.

Vanuit het oogpunt van productie dient preventief onderhoud van essentiële technische systemen te worden uitgevoerd gedurende inzetvrije perioden, zoals gespecificeerd in het productieprofiel. Het *productieprofiel* geeft de geplande inzet weer van de technische systemen in het productieproces. Dit profiel legt beperkingen op aan het moment, waarop uitvoering kan worden gestart en aan de doorlooptijd van die uitvoering.

De mogelijkheid om preventief onderhoud van essentiële systemen uit te voeren wordt begrensd door de hoeveelheid capaciteit die hiervoor beschikbaar is. De hoeveelheid wordt bepaald door de norm beschikbaarheid van de kritieke capaciteiten voorgedetermineerd onderhoud vastgelegd in de beladingsrestricties en door het gedeelte van de capaciteit dat reeds is toegewezen aan geprogrammeerd maar nog niet gerealiseerd werk.

De eisen die productie stelt aan het preventieve onderhoud van niet essentiële technische systemen zijn minder stringent. Er kan op korte termijn aan worden voldaan. Planning van dit onderhoud beperkt zich dan ook tot het bepalen van uiterste start-tijdstippen. Het vaststellen van de daadwerkelijke periode van uitvoering is het domein van onderliggende beslisfuncties, waarbij gedetailleerde informatie kan worden gebruikt.

Gegeven de vraag die de uiterste starttijdstippen specificiert wordt in de planning rekening gehouden met efficiency en capacitieve overwegingen. Efficiency overwegingen kunnen aanleiding zijn werkzaamheden eerder dan strikt noodzakelijk uit te voeren.

Vervroegen houdt in een verlies aan potentiële eenheden van gebruik, met een averechts effect op de efficiency. Tegenover dit verlies staan voordelen, die met het combineren van onderhoudsoperaties kunnen worden bereikt; gemeenschappelijke set-ups hoeven slechts een keer te worden uitgevoerd, parallelle uitvoering van werkzaamheden reduceert de benodigde stilstand.

Vanuit capacitieve overwegingen is het aan te raden de omvang van de uiteindelijke verzamelingen operaties te beperken. Hier mee wordt voorkomen dat deze verzamelingen moeilijk in uitvoering te nemen zijn en eenmaal in uitvoering de capaciteiten te lang blokkeren. Voorts dient het totale capaciteitsbeslag van adaptief onderhoud te blijven binnen de beladingsrestricties, en moet gestreefd worden naar een zo egaal mogelijke belading. Grote pieken en dalen in de belading bemoeilijken de werkordervrijgave.

Het plannen van preventief onderhoud resulteert in geprogrammeerd en adaptief onderhoud. Het geprogrammeerde onderhoud bestaat uit werkorders, die elk de uitvoering voorschrijven van een verzameling operaties binnen een gespecificeerde periode. Dit onderhoud vormt rechtstreeks input voor werkordercoördinatie. Adaptief onderhoud omvat verzamelingen van operaties die elk voor een uiterst tijdstip in uitvoering moeten worden genomen. Dit onderhoud wordt in de buffer ondergebracht, in afwachting van vrijgave.

– *Correctief onderhoudsclassificatie*

De correctief onderhoudsclassificatie richt zich op de timing van de uitvoering van de vraag naar correctief onderhoud. Dit gebeurt in overleg tussen productie en onderhoud. Voor het productie-management zijn de storingsconsequenties doorslaggevend; voor het onderhoudsmanagement staat de hoeveelheid capaciteit die nog beschikbaar is centraal.

De wens van productie om werk aan een storing als spoed onderhoud te classificeren kan door onderhoud worden gehonoreerd indien er nog voldoende capaciteitsruimte is. Deze ruimte wordt bepaald door de geschatte werklast van het reeds geaccepteerde maar nog niet uitgevoerde spoed onderhoud, en het maximaal toegestane beslag volgens de beladingsrestricties. Is er onvoldoende ruimte, dan kan niet aan de wensen van productie worden voldaan, en zit er niets anders op dan het als uitstelbaar onderhoud te bestempelen.

Overleg over de timing van uitstelbaar onderhoud moet de mate van uitstelbaarheid vastleggen, in de vorm van een uiterst starttijdstip. Voor productie geldt nog steeds het belang van de storing voor het productieproces. Vanuit het oogpunt van onderhoud wordt dit tijdstip bepaald door technische overwegingen, zoals toenemende schade aan het technische systeem en het capaciteitsbeslag van het reeds geaccepteerde uitstelbare werk in combinatie met de geldende beladingsrestricties. Ook hier moet gestreefd worden naar een zo gelijkmatig mogelijke belading van de capaciteiten.

Uit het voorgaande blijkt dat voor het classificeren van correctief onderhoud inzicht in de belading van de capaciteiten van het grootste belang is. Ten einde een zo goed mogelijk overzicht van dit beslag te hebben, dient de geschatte waarde, die in eerste instantie gehanteerd wordt, te worden bijgesteld nadat diagnose is afgerond en dienen de afwijkingen van de geschatte voortgang van het werk te worden teruggekoppeld.

Het classificeren van de vraag naar correctief onderhoud resulteert in spoed en uitstelbaar onderhoud.

Het *spoed onderhoud* bestaat uit werkorders die elk de onmiddellijke uitvoering van correctief onderhoud voorschrijven. Dit onderhoud vormt rechtstreeks input voor werkuitgifte.

Uitstelbaar onderhoud omvat correctieve werkzaamheden waarvan uitvoering moet worden gestart voor een uiterst tijdstip.

Dit onderhoud wordt in de buffer ondergebracht, in afwachting van vrijgave.

– *Werkordervrijgave*

Werkordervrijgave is de beslisfunctie die ervoor waakt, dat niet teveel werk tegelijkertijd onderhanden is. Door consequent niet meer werk vrij te geven dan is toegestaan kunnen de afspraken over de uitvoering van zowel preventief als correctief onderhoud worden nagekomen.

De mogelijkheid om werkorders vrij te geven wordt primair bepaald door het reeds geaccepteerde maar nog niet gerealiseerde werk en de beladingsrestricties. Deze bepalen immers de toegestane hoeveelheid en samenstelling van het werk-in-uitvoering. De ruimte tussen aanwezig en toegestaan, kan worden opgevuld door het genereren van nieuw werk.

Welke werkzaamheden uit de buffer op een bepaald moment daadwerkelijk worden vrijgegeven hangt allereerst af van de speelruimte van het werk met betrekking tot zijn uiterste start-tijdstip, zoals vastgelegd in de planning en de classificatie.

Voorts komen slechts die werkzaamheden in aanmerking, waarvoor de onderhoudscapaciteiten beschikbaar zijn. Voorts dienen de benodigde materialen, voor zover reeds bekend, klaar te liggen en is voor adaptief onderhoud de toezegging van productie nodig dat het technische systeem in kwestie in onderhoud kan worden genomen.

Tenslotte, kunnen op grond van efficiency overwegingen werkzaamheden van preventieve aard in de tijd naar voren worden gehaald om gebruik te kunnen maken van onverwachts optredende onderbrekingen van het productieproces bijvoorbeeld tengevolge van storingen. Correctief werk, met een lage prioriteit, kan worden gekoppeld aan preventief werk indien dit de uitvoeringskosten drukt. Dit opportunistisch onderhoud moet echter de doorlooptijd niet al te zeer verlengen en niet te omvangrijk zijn.

Het vrijgeven van werkorders zet het adaptief en uitstelbaar onderhoud om in werkorders, die opdracht geven om een verzameling operaties uit te voeren binnen een gespecificeerde periode.

– *Werkordercoördinatie*

Werkorder-coördinatie legt de basis voor de onderliggende beslissingen, die betrekking hebben op de voortgang van het werk.

Om de voortgang van een werkorder te volgen wordt deze opgesplitst in taken. Een taak is een verzameling operaties waarvan de uitvoering, zonder essentiële wachttijden, kan plaatsvinden. De coördinatie van werkorders levert de twee tijdstippen op, waartussen een taak dient te worden uitgevoerd. Deze tijdstippen

fungeren als interne voortgangsnormen, teneinde de vrijgegeven werkorders tijdig en tegen aanvaardbare kosten te realiseren. Voor de werkorder als geheel ligt nu het starttijdstip en het geplande gereedtijdstip vast.

Het op te stellen tijdplan zal zo goed mogelijk de wachttijden en uitvoeringstijden van de onderscheiden taken van een werkorder moeten weergeven. Hierbij dient naast de interne structuur van de werkorder ook aandacht te worden besteed aan de wensen van produktie, aan de belading van de capaciteiten, en aan de specifieke beperkingen, die bijvoorbeeld ruimte en werkomstandigheden opleggen aan de timing van taken.

De uitvoering van diagnoses en inspecties resulteert in een vraag naar capaciteit om de benodigde reparaties uit te voeren. Op grond van deze informatie worden nieuwe taken gegenereerd, die in de coordinatie van de werkorder worden meegenomen. Problemen in de voortgang van het werk kunnen tot gevolg hebben, dat werkorders niet tijdig kunnen worden gestart. Afhankelijk van het type order zullen deze alsnog worden uitgegeven.

– *Werkuitgifte*

Het uitgeven van werk betreft het vaststellen van de volgorde waarin de taken door een capaciteitsgroep worden uitgevoerd. Deze beslissing moet rekening houden met de voortgang en het belang van het werk.

De voortgang van het werk als geheel en per capaciteitsgroep dient te worden bijgehouden. De voortgang per capaciteitsgroep kan worden afgeleid van de tijdsplanning, zoals vastgelegd in de werkordercoördinatie. De korte termijn kritieke capaciteiten komen op deze wijze aan het licht en de capacitieve flexibiliteit kan worden gebruikt om deze bottlenecks op te lossen. De omvang van zo een bottleneck kan mogelijkwijs op korte termijn worden vergroot door overwerk.

Daarnaast kan de multi-inzetbaarheid van medewerkers worden benut. Het gebruik van deze mix flexibiliteit bevordert de doorstroming van het werk, en minimaliseert het achterlopen op de voortgang.

Het belang van het werk gaat een rol spelen indien er taken achterliggen op het schema. Dit belang wordt onder andere bepaald door de prioriteit van de werkorders en de status van de taken binnen die werkorders.

De speelruimte per taak die nog resteert kan worden gebruikt door een capaciteitsgroep om het werk naar eigen goeddunken in te richten, dat wil zeggen: te streven naar een zo efficiënt mogelijke uitvoering. Het gaat hierbij echter om beslissingen binnen een capaciteitsgroep, die buiten het bestek van dit artikel vallen.

8. Slotopmerkingen

Onderhoudsbeheersing is in het algemeen te karakteriseren als complex en onzeker. De structuur van het beheersingssysteem dient primair te zijn toegesneden op het reduceren van de complexiteit, zonder daarbij al te veel beslissingsvrijheid in te leveren. De mate van onzekerheid bepaalt vervolgens de wijze waarop de beslisfuncties worden ingericht binnen deze structuur.

De structuur van het voorgestelde beheersingssysteem is gebaseerd op een gefaseerde verfijning van de beheersing: algemene beslissingen gebaseerd op geaggregeerde informatie, leggen beperkingen op aan gedetailleerde beslissingen op een lager niveau. Nieuwe, afwijkende informatie kan aanleiding zijn reeds genomen beslissingen bij te stellen. Daar een groot deel van deze informatie pas tijdens de uitvoering van het werk naar boven komt, is het niet gewenst om beheersing en uitvoering te scheiden. Terugkoppeling en voortgangsbewaking spelen derhalve een belangrijke rol. De hiërarchie in beslisfuncties impliceert niet, dat deze functies ook organisatorisch apart moeten worden ondergebracht. Meerdere beslisfuncties kunnen de verantwoording zijn van een en dezelfde beslisser.

Verder onderzoek betreft de praktische bruikbaarheid van de voorgestelde beslissingsstructuur. De nadruk zal daarbij liggen op de wijze waarop de onderscheiden operationele beslisfuncties dienen te worden ingericht, afhankelijk van de karakteristieken van de te beheersen situatie. Daarnaast moet aandacht worden besteed aan de onderbouwing van de wijze waarop de keuzes op de hogere niveaus van besluitvorming tot standkomen. Deze beslissingen bepalen immers de speelruimte die uiteindelijk op het operationele niveau rest.

Literatuur

1. Morse, P.M., *Queues, Inventories and maintenance*. New York, John Wiley, 1958.
2. Barlow, R.E., F. Proschan, *Mathematical theory of reliability*. New York, John Wiley, 1965.
3. Geurts, J.H.J., *On the selection of elementary maintenance rules*. Proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 1986.
4. Geraerds, W.M.J., *Towards a theory of maintenance*. In R. Bureau (ed.), *On the organization of logistic support systems*. London, The English University Press 1972, blz. 297-329.
5. Kelly, A., *Maintenance planning and control*. London, Butterworths, 1984.
6. Nowlan, F.S., H.F. Heap, *Reliability centered maintenance*. Washington, National Technical Information Services, Res. no: A566-579, 1978.
7. Maas, J.F.M., *Het methodisch ontwerpen van een onderhoudsconcept*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven, 1986.
8. Lambooy, M.H., *Het ontwerpen van onderhoudsconcepten bij DMV Campina BV Veghel*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven, 1987.
9. Gaag, M.C.A. van der, *Introductie van het onderhoudsconcept bij Mora Snacks*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven, 1988.
10. Orlicky, J. *Material requirements planning*. McGraw Hill, New York 1975

11. Plossl, G.W., Welch, W.E. *The role of top management in the control of inventory*. Reston Publ. Co., Reston 1979.
12. Bertrand, J.W.M., Wijngaard, J. *De structuur van produktiebeheersingssystemen*. Informatie 27 (1985) blz. 342-355.
13. Gits, C.W. *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept; een kader*. In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgerij 1987, hoofdstuk D3010.
14. Monhemius, W. *Enkele principes uit de conventionele voorraadbeheersing*. In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgerij 1987, hoofdstuk E2010.
15. Geurts, J.H.J. *On the robustness of 'insurance type' spares provisioning strategies*. Proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 1986.
16. Galbraith, J.R. *Designing complex organizations*. Addison Wesley, Reading 1973.
17. Anthony, R.N. *Planning and control systems; A framework for analysis*. Harvard University Press, Boston 1965.

1. Wat zijn kosten en waar komen ze vandaan?

In elk bedrijf is sprake van een zeker bedrijfs- of productieproces, waarin waarde wordt toegevoegd aan goederen en diensten afkomstig van de inkoopmarkt, om die dan wederom als goederen of diensten te leveren aan de verkoopmarkt.

De goederen en diensten die voor het productieproces vereist zijn, noemt men *produktiefactoren*: menselijke arbeid, machinearbeid, grondstoffen, energie, en dergelijke. De produktiefactoren worden geleverd door *produktiemiddelen* die aanwezig zijn in het bedrijf. De waarde van de offers die gebracht worden om de produktiefactoren te verkrijgen noemt men *kosten*.

Om de produktiefactoren te verkrijgen zijn in het bedrijf twee soorten zaken aanwezig:

1. *liquiditeiten* ofwel middelen die kunnen dienen om te betalen, in de vorm van kasgeld en van giro- en banktegoeden;
2. *produktiemiddelen* ofwel zaken die het productieproces in stand kunnen houden door hun vermogen om produktiefactoren te kunnen leveren. Ze kunnen worden ingedeeld naar:
 - personele middelen, het personeel in dienst van het bedrijf met als produktiefactor de arbeidsprestaties van al lerlei soort;
 - bedrijfsmiddelen, de duurzame materiele produktiemiddelen in de vorm van grond, gebouwen, installaties, machines, voertuigen, en dergelijke;
 - voorraden grondstoffen, halffabrikaten en verkoopprodukten;
 - immateriële of onstoffelijke produktiemiddelen die bestaan uit contracten met derden voor gebruik van octrooien, levering van energie, en dergelijke, en uit in tekeningen, in structies en recepten vastgelegde bedrijfskennis.

Het is gebruikelijk om in de administratie bij te houden wat de waarde is van de aanwezige liquiditeiten en de aanwezige bedrijfsmiddelen en voorraden. Ook

neemt men soms een bepaalde waarde op voor de immateriele produktiemiddelen.

Deze waarden worden periodiek opgenomen op een balans als bezittingen onder het hoofd Activa.

Kosten nu ontstaan door vermindering van de in de administratie geregistreerde waarde:

- van *liquiditeiten*, door betalingen die geen toeneming van bezit ten gevolge hebben en die daarom rechtstreeks als kosten worden geboekt, zoals loon- en energiekosten;
- van *bedrijfsmiddelen*, door afboeking in de vorm van afschrijvingskosten of wegens veroudering, incurant worden en dergelijke.

Voor de volledigheid merken wij op dat de balanswaarde van een produktiemiddel niet alleen kan toenemen door uitgaven bij aankoop maar ook door de zogenoemde *herwaardering*. Dit is een soms positieve correctie op het bedrag waarvoor de produktiemiddelen in de administratie zijn opgenomen.

2. Wat is de betekenis van kosten?

De betekenis van 'kosten' bij bestudering van bedrijfsprocessen is drieledig:

Ten *eerste* zal bij de besluitvorming op korte en op lange termijn gebruik worden gemaakt van toekomstige 'kosten' om de financiële gevolgen te ramen van een mogelijke keuze.

Men zal in het algemeen die mogelijkheid kiezen die de meest gunstige respectievelijk minst ongunstige invloed heeft op de toekomstige financiële positie van het bedrijf.

Ten *tweede* zal, nadat de keuze is gemaakt, worden bepaald welke kosten per verantwoordelijke functionaris mogen worden gemaakt. Men bedient zich hierbij veelal van 'normatieve' waarden, die zijn gebaseerd op de hoeveelheid *offers* die technisch noodzakelijk en economisch verantwoord zijn.

De waarden behoren met de genoemde functionarissen te worden besproken en door hen te worden geaccepteerd.

De afspraken worden vastgelegd in 'jaarbudgetten' waarvan voor dit onderwerp twee soorten van belang zijn:

- *investeringsbudgetten*, waarin alle bedrijfsmiddelen staan die mogen worden verworven met aantal, soort en toegestane uitgaven. De verwerving kan geschieden door eigen ontwikkeling (al of niet met constructie in eigen bedrijf) of door koop of huur op lange termijn (leasing);

- *kostenbudgetten*, waarin de produktiefactoren staan die mogen worden opgeofferd met hoeveelheid, soort en waarde.

Ten *derde* zullen kosten een rol spelen, tijdens de invoering van het in de budgetten vastgelegde produktieplan. Men zal het werkelijk gebeuren vergelijken met hetgeen is vastgelegd in de budgetten als afspraken en daarover rapport uitbrengen aan de verantwoordelijke functionarissen en de hogere leiding.

Bij vele bedrijven bepaalt men zich bij de verantwoording tot kostenbedragen. Kosten zijn echter slechts een afspiegeling van het werkelijke gebeuren en het zal duidelijk zijn dat de feitelijke bijsturing van processen gebaseerd moet zijn op de *hoeveelheden* produktiefactoren die (zullen) worden opgeofferd.

Stel dat we een rapportering willen hebben over het benzineverbruik van service-auto's.

Een controle op de *hoeveelheid* benzine op basis van gereden kilometers en het normatieve gebruik in liters per kilometer zal dan te verkiezen zijn boven het *bedrag* van de gebruikte benzine. In het laatste geval zullen de fluctuaties in de benzineprijs immers een verstorende rol spelen.

Het zal duidelijk zijn dat de in het budget vastgelegde normen, die een taakstelling inhouden voor de verantwoordelijke persoon zoveel mogelijk moeten luiden in hoeveelheden.

Doch ook bij kwantitatieve afwijkingen van de werkelijkheid ten opzichte van het budget zal men met voorzichtigheid moeten oordelen en handelen.

Stel dat in het budget is vastgelegd dat de Technische Dienst (TD) alle werkzaamheden in de normale bedrijfsuren zal verrichten en dat op grond daarvan de toegestane arbeidskosten per uur zijn vastgesteld.

Op een bepaald tijdstip ontstaat een ernstige storing en daarmee een dreigende productieachterstand die zou kunnen leiden tot boetebetaling van Hfl 10.000, – aan de gedupeerde afnemer.

De beslissing tot reparatie in overwerkuren wordt genomen op grond van de minst ongunstige financiële gevolgen voor het bedrijf als geheel (en niet enkel voor de Technische Dienst).

Men schat de extra-uitgaven voor overwerk op Hfl 2.000, – en stelt dit bedrag tegenover de Hfl 10.000, – dreigende boetebetaling. Door dit besluit te nemen is voor het bedrijf ($10.000 - 2.000 =$) Hfl 8.000, – bespaard, maar wat ziet de chef technische dienst ?

Een *verlies* van Hfl 2.000,

Bij beslissingen op korte termijn zullen we namelijk in de praktijk het kostenbudget niet (kunnen) aanpassen, hetgeen ons niet mag verhinderen om de beste beslissing te nemen.

In de rapportering zal de afwijking tussen werkelijkheid en budget altijd moeten worden voorzien van een toelichting.

3. Welke kosten zijn er?

De kosten die zijn verbonden aan het gebruik van produktiefactoren kunnen worden ingedeeld naar verschillende criteria:

- naar homogeen te achten *soorten* produktiefactoren volgens onderstaande tabel:
- naar *functie* waarvoor de produktiefactoren worden opgeofferd. Afhankelijk van de aard van het bedrijf zal men een of meer van de volgende functies onderscheiden:
- inkoop van materialen, diensten en bedrijfsmiddelen;
- ontwikkeling van producten, bedrijfsmiddelen en bedrijfsprocessen;
- fabricage van halffabrikaten en verkoopprodukten;
- verkoop van produkten.

productiemiddel	produktiefactor	kostensoort
personeel	menselijke arbeid	loonkosten
bedrijfsmiddel		
– machines	machineprestatie	afschrijvings- en rentekosten
– gebouw	huisvesting	afschrijvings- en rentekosten
contracten	diensten derden	energiekosten schoonmaakkosten enzovoort
voorraden	materialen	materiaalkosten

Tabel 1. Kostensoorten naar produktiefactoren

Bij een verfijnde indeling kan men bijvoorbeeld de functie 'fabricage' weer splitsen in: directe produktieactiviteit, onderhoudsactiviteit, enzovoort. Bij verdergaande indeling kan men bijvoorbeeld de onderhoudsactiviteit met de daarbij behorende kosten splitsen in: reparatie, preventief onderhoud, revisie, verlenging van gebruiksduur, wijziging, enzovoort.

- naar de *oorzaak* van hun *ontstaan*

Er zijn produktiefactoren die *activiteitsgebonden* zijn; hoe hoger het niveau van de activiteiten (bijvoorbeeld afgelegde kilometers) des te groter de gebruikte hoeveelheid (benzine).

De activiteitsgebonden produktiefactoren leiden tot variabele kosten die ongeveer proportioneel zijn met de omvang van de activiteiten.

Andere produktiefactoren zijn *capaciteitsgebonden*, ze worden bepaald door de omvang van de in het bedrijf aanwezige produktiemiddelen en daarmee door de capaciteit die ter beschikking staat. Bekende voorbeelden zijn de afschrijving en het vermogensgebruik, die leiden tot respectievelijk afschrijvings- en rentekosten.

Men noemt deze soort kosten veelal *vaste* kosten, omdat ze op korte termijn, bij onveranderde capaciteit, niet variëren. Ze zijn op langere termijn uiteraard ook variabel en wel met het aantal bedrijfsmiddelen zoals aantal machines, vloeroppervlakte, aantal auto's en dergelijke.

Een deel van de loonkosten van toezichthoudend personeel zal in de regel zijn te beschouwen als capaciteitsgebonden.

– naar de *plaats* in de organisatie van de budgethouder

De verantwoording voor de uitvoering van de in de budgettering besloten opdrachten en de bevoegdheid om daarvoor de vastgelegde produktiefactoren te gebruiken behoort te berusten bij een persoon; wel kan een persoon de verantwoording dragen voor meer dan een budget.

Het kostenbudget heeft betrekking op een bepaalde groep activiteiten, die vanuit kostenstandpunt wel 'kostenplaats' wordt genoemd. Zo vindt men in een budget de kosten per *kostenplaats*

per verantwoordelijk functionaris, bijvoorbeeld afdelingschef.

– naar de *drager* van de kosten

In de bedrijfseconomische literatuur wordt deze indeling gebruikt om aan te geven voor welk produkt of voor welke groep van produkten de kosten uiteindelijk worden gemaakt.

– naar de *fase* van de *levenscyclus*, waarin de kosten ontstaan.

Deze indeling wordt in paragraaf 5 besproken.

4. Welke kosten zijn van belang voor technische en onderhoudsdiensten?

Beantwoording van deze vraag kan pas plaatsvinden wanneer de functies van de diensten zijn vastgesteld. Afhankelijk van de zwaarte daarvan zullen de functionarissen ervan in meer of mindere mate deelnemen aan de beslissingen omtrent de wijze waarin wordt voorzien in de behoefte aan produktiefactoren.

Gegeven het assortiment produkten dat men op de verkoopmarkt wil aanbieden en gegeven een ruwe schatting van het aantal dat men hoopt te verkopen, blijven nog vele mogelijkheden open. Men kan het verkoopprodukt bij derden *inkopen* en zich aldus tot handel beperken. Ook kan men de fabricage zelf ter hand nemen en daarbij een groter of kleiner deel van de bewerkingen uitbesteden.

Tenslotte kunnen de bewerkingen die men in eigen bedrijf wenst uit te voeren worden gedaan met zelf geconstrueerde, dan wel met gereed ingekochte of soms gehuurde machines. Bij al deze beslissingen zal het van belang zijn of de kennis van de processen en de benodigde produktiemiddelen in eigen bedrijf aanwezig zijn. In het bevestigende geval zal men een schatting willen hebben van de financiële gevolgen van elk der alternatieven.

Los van de functie van de technische dienst in het bedrijf zal men altijd kiezen voor het meest gunstige alternatief voor de vervaardiging van het verkoopproduct in de gewenste kwaliteit, op de gewenste plaats en tijd. Daarbij zijn voor de technische dienst alle uitgaven van belang die betrekking hebben op de verkrijging van de bedrijfsmiddelen en op de levering van de beoogde produktiefactoren. Ontwerp en onderhoud van het van het bedrijfsmiddel bijvoorbeeld zullen van invloed zijn op de levensduur ervan en op de kwaliteit van de te leveren prestaties.

Om *financiële optimalisatie* ofwel *uitgaven-minimalisatie* mogelijk te maken zullen vele beslissingen nodig zijn:

- op lange termijn, bijvoorbeeld kopen of huren van het bedrijfsmiddel;
- op middellange termijn, bijvoorbeeld vervangen of niet, optimale onderhoudsinterval;
- op korte termijn, bijvoorbeeld overwerken of uitbesteden.

Het hoofd technische dienst (onderhoudsdienst) beschikt over gegevens die nodig zijn bij de bovengenoemde beslissingen. Het is zijn taak die gegevens systematisch te (doen) verzamelen. Daarbij moet hij aansluiten aan de in het bedrijf gebruikte *beslissings-ondersteunende modellen*. Dit zijn in het algemeen gegevens per bedrijfsmiddel (of per onderdeel daarvan) die kunnen dienen bij de schatting van toekomstige gegevens en als invoer moeten dienen bij de genoemde modellen. Wij noemen als voorbeeld: de hoeveelheid reparatie- en onderhoudsuren, alsmede het materiaal-verbruik van machines en voertuigen als functie van de leeftijd, respectievelijk van de gecumuleerde hoeveelheid prestaties. Het criterium bij beslissingen inzake bedrijfsmiddelen zal steeds worden gezocht in de minimale toekomstige kosten per benodigde prestatieeenheid.

Deze toekomstige kosten worden gevormd door uitgaven en door vermindering van de restwaarde van het produktiemiddel. Bij keuze uit alternatieve ontwerpen zullen de kosten gelijk zijn aan de toekomstige uitgaven, verminderd met de verwachte restwaarde, zodat dan de kosten van de *gehele* projectcyclus een rol spelen. Deze cyclus omvat het tijdvak vòòr het gebruik, de gebruiksduur en eventueel het tijdvak nà het gebruik (bijv. bij kerncentrales).

Ook in de gebruiksfase van een bedrijfsmiddel zal de technische (onderhouds-)dienst op de hoogte moeten blijven van de kosten om de daarvoor geleverde capaciteit aan produktiefactoren in stand te houden. Om in tijden van problemen wegens drukte, storingen en dergelijke de afnemers tijdig te bedienen zullen uit-

gaven worden gedaan die geen onderhoudskosten zijn, maar toch met het onderhoud hebben te maken. Wij noemen hier: vorming van buffervoorraden van tussen- en verkoopprodukten, uitbesteding bij derden, overwerk, spoedzendingen en dergelijke. De kosten daarvan zullen gesteld moeten worden tegenover de kosten van een extra-machine en van preventief onderhoud.

Een bedrijf zal bij het zoeken naar alternatieve oplossingen van onderhouds- en storingsproblemen uitgaan van de regel, dat de afleveringen op tijd moeten plaatsvinden. Voor dat doel kunnen soms uiteenlopende zaken dienen:

- extra voorraden
- extra produktiemiddelen
- preventief onderhoud
- uitbesteding
- overwerk
- verzending als luchtvracht
- etcetera.

Zolang men kan verwachten dat alternatieve of gecombineerde oplossingen dezelfde (grote) kans bieden dat de klant tijdig wordt geleverd, kan men zich bij de calculatie die de beslissing moet ondersteunen baseren op een gegeven bedrag aan ontvangsten van de klant. Men kan zich dan bij de keuze van de beste oplossing laten leiden door de mogelijkheid die de laagste uitgaven met zich mee brengt.

5. De levenscyclus

Men kan alle activiteiten in het bedrijf zien als behorende bij *projecten* met een bepaalde levensduur. Een vergelijkend beeld dat zich daarbij opdringt is het leven van de mens, en daarom spreekt men wel van een *levenscyclus* met de fasen: groei, bloei en teruggang.

Onder een project dat de levenscyclus doorloopt verstaan we: het geheel van activiteiten, uitgevoerd in een tijdelijk samenwerkingsverband van personen op basis van een vooraf opgestelde specificatie.

Een bedrijf, behorend tot een onderneming of tot een overheidsorganisatie, is in deze visie een project met een (hopenlijk) lange levensduur. De specificatie van het bedrijf als project vinden we in het *strategisch plan*, dat aangeeft in welk gebied van het economische leven het bedrijf actief wil zijn.

Dit houdt een afbakening in van de soort produkten die zullen worden aangeboden aan de markt en die kunnen behoren tot:

- *materiele* goederen, zoals landbouwprodukten, voedingsmiddelen, metaalprodukten, machines, textiel en chemicaliën;
- *immateriele* goederen, zoals diensten van ziekenhuizen, hotels, banken, adviesbureaus en vervoersbedrijven.

Om het strategisch plan te concretiseren zijn projecten nodig die het aan te bieden produkt specificeren. Het *produktplan* geeft aan hoe de gehele productcyclus moet gaan verlopen.

De levenscyclus van een produkt begint met de ontwikkeling, waarna als het goed gaat de introductie op de markt de bloeifase inluidt. Hij eindigt met de verwijdering van het produkt uit het assortiment.

Alle voorzienbare ontvangsten en uitgaven (die tot 'kosten' kunnen worden) moeten in het plan zijn opgenomen, omdat men zich voor dat met de uitvoering wordt begonnen een oordeel moet vormen over de financiële wenselijkheid van de toevoeging van het produkt aan het assortiment. Voor de keuze van de juiste bedrijfsmiddelen en de toe te passen onderhoudsmethode is de geschatte levensduur van het produkt, het maximale omzetsniveau en de eventuele seizoensfluctuaties van belang, vooral wanneer voor dat produkt specifieke gebouwen, installaties of machines zijn vereist.

De bedrijfsmiddelen moeten zo worden gekozen dat ze, gezien het op de markt aan te bieden produkt, zullen leiden tot een minimaal bedrag aan uitgaven gedurende de gehele levenscyclus van alle produkten die zullen worden voortgebracht met de door die bedrijfsmiddelen te leveren produktiefactoren. Daartoe is kennis nodig van de levenscyclus van de *bedrijfsmiddelen*, waar in we drie fasen kunnen onderscheiden:

verwervingsfase

Wanneer sprake is van koop of huur zal men een keuze maken uit de beschikbare mogelijkheden. Bij bedrijfs- of produktspecifieke machines zal in deze fase het ontwerpen en construeren plaatsvinden. In beide gevallen eindigt de fase met de installatie en de aanloop van het bedrijfsmiddel.

Deze fase is voor de technische (onderhouds-)dienst in twee opzichten van belang: er zal advies moeten worden gevraagd en gegeven en de basis moet worden gelegd van de toekomstige onderhoudstaak naar omvang, naar kwaliteit en naar te volgen methode.

gebruiksfase

Hierin levert het bedrijfsmiddel zijn produktiefactoren in het productieproces. Van belang voor de technische (onderhouds-)dienst zijn de keuze van de onderhoudsmethode en de efficiëntie van de organisatie en de procedures.

liquidatiefase

Dit is de fase waarin het bedrijfsmiddel zal worden afgestoten en er ofwel door sloop een einde komt aan de gebruiks- en levenscyclus, ofwel door verkoop als 'tweedehands' een einde komt aan de voor ons relevante gebruiksfase binnen het eigen bedrijf.

Liquidatie vindt plaats aan het einde van één van de volgende levenscycli:

- die van het bedrijf

- die van het produkt
- die van het produktiemiddel.

De eerste twee mogelijkheden vinden hun basis altijd in economische overwegingen; voortzetten van de activiteiten is in dat geval financieel minder aantrekkelijk dan stopzetting ervan.

De derde mogelijkheid, einde van het gebruik van het produktiemiddel, kan twee redenen hebben die niet scherp te scheiden zijn en daarom in nauwe samenwerking tussen de technische en commerciële functionarissen moeten worden bezien. We doelen hier op de technische en de economische gronden waarop een bestaand bedrijfsmiddel al of niet wordt vervangen. Indien de levensduur van een eventueel nieuw aan te schaffen produktspecifieke machine langer is dan de resterende levensduur van het produkt, dan moeten de volle uitgaven van het nieuwe exemplaar op de resterende, economisch bepaalde, levensduur van dat produkt drukken.

De eventuele liquidatiewaarde van de bestaande machine komt in mindering van de uitgaven voor een nieuwe machine, zodat hier de invloed van de kwaliteit van onderhoud een rol kan spelen.

Afgezien van de bovenbedoelde verstrengeling van produktcyclus en bedrijfsmiddelcyclus zal men tot vervanging overgaan wanneer men met een nieuwe machine, op de lange duur, lagere uitgaven verwacht voor de verkrijging van de benodigde produktiefactoren. Naarmate de technische ontwikkeling sneller gaat zal de vervanging veelvuldiger geschieden om economische redenen, dat wil zeggen om andere dan technische redenen (slijtage bestaande machine). Aanleiding tot economische vervanging zijn de dalende aankooprijzen bij een gegeven prestatievermogen, zoals bij computers, ofwel dalende exploitatie-uitgaven per prestatie-eenheid.

Door de toegenomen snelheid waarmee bedrijfsmiddelen, produkten, processen en materialen veranderen zien wij een verkorting van zowel de produkt- als de bedrijfsmiddel-levensduur. De natuurlijke neiging om het nieuwste te willen hebben kan worden beheerst door een koele rekenmethode, waarmee we zullen kennis maken.

6. Optimalisatie van onderhoudskosten

Deze titel is alleen zinnig als we met onderhoudskosten bedoelen: 'alle uitgaven, nodig om te voorzien in de benodigde hoeveelheid prestatie-eenheden van een bedrijfsmiddel'.

Of die uitgaven worden geboekt onder investeringen, dan wel als onderhouds-uitgaven maakt geen enkel verschil. Evenmin maakt het verschil of de uitgaven worden gedaan door de technische dienst of door een andere instantie in het bedrijf.

We geven een eenvoudig voorbeeld van de draagwijdte van optimaliseren van kosten van prestaties; we laten daarbij de rente-kosten buiten beschouwing. *Stel* een machine die geen liquidatiewaarde heeft en waarvan we de diensten nog lange tijd nodig zullen hebben kost Hfl 30.000. Een deel van de exploitatie-uitgaven zijn afhankelijk van de leeftijd van de machine; ze bedragen het eerste jaar Hfl 1.000 en stijgen met Hfl 2.000 per jaar.

De geleverde en benodigde prestatie-eenheden zijn constant, zodat we de gemiddelde uitgaven per jaar moeten minimaliseren. De prestatie-eenheid is hier 'een jaar lang produktie-factoren leveren'.

In onderstaande tabel hebben we berekend hoe groot de gemiddelde uitgaven zijn als functie van de gebruiksduur van de machine ($D_f = \text{Hfl } 1.000$).

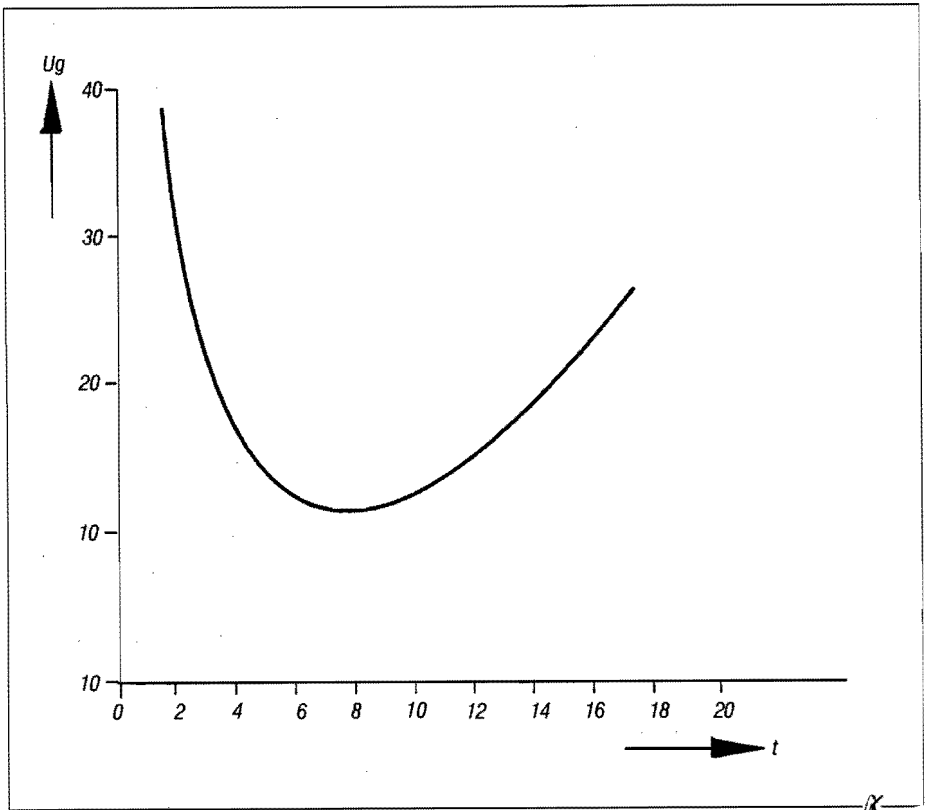
We zien dat bij een gebruiksduur van 5 of 6 jaar de uitgave per prestatie-eenheid Hfl 11.000 zijn, hetgeen ook tot uiting komt in de volgende grafiek, waarin de uitgaven (U_g) per jaar zijn weergegeven als functie van gebruiksduur in jaren (t).

<i>Leeftijd (jaren)</i>	<i>Uitg. in leeftijdsjaar (D_f)</i>	<i>Cumulatieve uitgaven (D_f)</i>	<i>Gemiddelde uitgaven (D_f)</i>
0	30	30	Aankoopsom
1	1	31	31
2	3	34	17
3	5	39	13
4	7	46	11,5
5	9	55	11
6	11	66	11
7	13	79	11,3
8	15	94	11,8
9	17	111	12,3
10	19	130	13
11	21	151	13,7
enz.			

Zoals blijkt is het, afgezien van de hier verwaarloosde rentekosten, niet van belang of we het geld uitgeven aan aankoop of aan exploitatie.

In de praktijk worden veelal foutieve beslissingen genomen door eenzijdig aandacht te besteden aan ofwel de hoogte van de investeringsuitgaven ofwel de hoogte van de onderhoudskosten in engere zin.

Stel dat de directie ten aanzien van de machine in bovenstaand voorbeeld het besluit neemt om het bedrag aan investeringen te verlagen en dat in het vervolg een andere machine, die hetzelfde presteert, wordt gekocht voor Hfl 25.000, waarvan de leeftijdsgebonden uitgaven in het eerste jaar Hfl 1.500 bedragen en stijgen met Hfl 3.000 per jaar.



Figuur 1. Uitgaven per jaar als functie van gebruiksduur in jaren

Maken we eenzelfde opstelling dan vinden we dat de optimale gebruiksduur van deze machine slechts 4 jaar is en dat daarbij de gemiddelde kosten per jaar liggen op Hfl 12.200. Het lagere investeringsbedrag per machine betekent hier hogere totale kosten.

Bij een beslissing moeten *alle* gevolgen daarvan in de beschouwing worden betrokken. De modellen die een bepaalde soort beslissing ondersteunen moeten 'rekening' houden met alle financiële gevolgen voor het bedrijf. Veranderingen in de geldstroom, dus veranderingen in de ontvangsten, in de uitgaven en in de waarde van bezit moeten in het model kunnen worden ingevoerd. Bij beslissingen op het gebied van bedrijfsmiddelen zal men veelal uitgaan van een bepaalde specificatie van de hoeveelheid, de kwaliteit en de leverbetrouwbaarheid van de vereiste productiefactoren, omdat op grond van deze specificatie een raming gemaakt is van de te verkopen hoeveelheden produkt en de daarbij behorende verkoopprijzen. In dat geval kan men de ontvangsten uit verkoop als een gegeven

aannemen en zich bij de keuze uit alternatieve mogelijkheden beperken tot een minimalisatie van de uitgaven.

Zoals opgemerkt kan men die uitgaven zien als toekomstige kosten:

- investeringsuitgaven zullen later afschrijvings- en rentekosten meebrengen;
- andere uitgaven worden direct geboekt als loonkosten, onderhoudskosten, voorraadkosten, vrachtkosten, energiekosten en dergelijke.

7. Kosten in de budgettering

De voorgaande paragraaf was gewijd aan de rol van de kosten bij de beslissingen die men in het bedrijf neemt om de voor het productie-proces benodigde produktiefactoren te verkrijgen tegen de laagste kosten. Als criterium daarbij wordt gebruikt: de grootste positieve geldstroom voor het gehele bedrijf, rekening houdend met de waardevermindering van de bezittingen.

Nadat de beslissingen zijn genomen over bijvoorbeeld de aankoop van bedrijfsmiddelen en de optimale wijze om deze in goede staat te houden zullen de gekozen mogelijkheden moeten worden verwezenlijkt. Daarvoor is het nodig dat aan bepaalde personen bepaalde taken worden gegeven, afhankelijk van hun functionele plaats in het bedrijf.

De uit te voeren taken en de middelen die daarvoor, na afspraak mogen worden gebruikt, worden vastgelegd in investerings- en kostenbudgetten.

Investeringsbudgetten geven per soort bedrijfsmiddel aan hoeveel en tegen welke prijs er mag worden verworven door koop of door zogenaamde financiële huur (financial lease). In het eerste geval krijgt het bedrijf de eigendom van het bedrijfsmiddel. In het laatste geval wordt een langdurig huurcontract afgesloten, waarvan de looptijd ongeveer gelijk is aan de te verwachten gebruiksduur van het activum; economisch staat dit gelijk met koop onder gelijktijdige afsluiting van een hypotheek- of pandovereenkomst.

Kostenbudgetten geven per groep, bijvoorbeeld per afdeling, aan wat van de budgethouder wordt verwacht en hoeveel produktiefactoren hij mag gebruiken om aan deze verwachting te voldoen. Een goed kostenbudget is gebaseerd op beslissingen die samen met de budgethouder zijn genomen. De beslissingen worden voor zover nodig, vastgelegd in normen of ratio's.

Een *ratio* is een verhouding tussen twee grootheden waarbij de ene grootheid (de afhankelijke variabele) afhangt van een andere grootheid (de onafhankelijke variabele). Deze laatste zal op zijn beurt van een andere variabele afhangen.

Met behulp van de afgesproken ratiowaarden kan worden bepaald welke hoeveelheid produktiefactoren mogen worden gebruikt, gegeven het productieplan voor de budgetperiode (meestal een jaar). Met behulp van prijzen wordt daarna berekend wat de toegestane kosten zijn. Ze worden meestal berekend per afdeling en gespecificeerd naar homogene produktiefactoren, de in paragraaf 3 besproken kostencategorieën:

- arbeidskosten
- energiekosten
- andere kosten van diensten van derden
- kosten van materialen
- kosten van hulpafdelingen binnen het bedrijf, zoals huisvestingsdienst.

De verwachte activiteiten van de technische(onderhouds-)dienst berusten meestal op drie pijlers:

Ten eerste op de *projecten* waarin in het komende jaar zal worden gewerkt, zoals bouw van installaties en machines, grote ombouw of revisie, sloop van installaties, en dergelijke.

Ten tweede op het *aantal bedrijfsmiddelen* in de produktieafdelingen en in sommige hulpafdelingen, waarvoor preventief onderhoud moet worden verricht.

Ten derde op het *aantal prestatie-eenheden* dat de bedrijfsmiddelen moeten leveren en dat voor het onderhoud kan worden berekend aan de hand van het produktieplan, dat afhangt van de mate van gebruik van de bedrijfsmiddelen.

De kosten die de technische (onderhouds-) dienst mag uitgeven volgen uit deze drie gegevens en uit de ratio's, die voortvloeien uit de overeengekomen werkwijze inzake de activiteiten van de technische dienst.

Een eenvoudig *voorbeeld* van de wijze waarop voor de technische (onderhouds-) dienst de toegestane arbeidskosten voor een bepaalde machine kan worden berekend.

Stel dat voor die machine de optimale onderhoudsmethode leidt tot het volgende causal verband (R = ratio):

$$\text{onderhoudsuren} = R1 \times \text{aanwezige machine(s)} + R2 \times \text{verwachte machine-uren,}$$

waarin R1 = 10 uren per aanwezige machine

en R2 = 0,04 uren per verwacht machine-uur.

In het produktieplan zijn 10.000 produkten opgenomen, die per stuk 0,1 machineuur aan prestatie van de desbetreffende machinegroep vereisen, zodat het aantal verwachte machine uren is: $0,1 \times 10.000 = 1.000$ uren.

De verwachte onderhoudsuren van de technische dienst zijn dan voor deze machine:

$$10 \times 1 + 0,04 \times 1000 = 50 \text{ uren.}$$

Zo kan van elke machine(groep) de verwachte onderhoudsuren worden bepaald.

8. Kosten in de rapportering

De taken van de functionarissen worden vastgelegd in kostenbudgetten, die in de regel eenmaal per kalenderjaar worden opgesteld. Ze behoren te zijn gebaseerd op de verwachte activiteiten volgens het produktieplan en zijn mede een instrument voor de planning.

Eenzijds wordt aan de verantwoordelijke budgethouder een taak gesteld, volgens met hem gemaakte afspraken. Anderzijds krijgt hij de machtiging om te beschikken over de produktiefactoren (menselijke-arbeid, machine-arbeid, ruimte, materialen, en dergelijke) die nodig zijn om deze taak te vervullen.

Kostenbudgetten worden een instrument ter beheersing van het bedrijfsproces, indien men in de loop van het jaar rapporteert over de werkelijke situatie, vergeleken met de gebudgetteerde activiteiten en produktiefactoren. De vergelijking dient zoveel mogelijk op hoeveelheden gebaseerd te zijn.

Afgezien van processen die een geldstroom tot object hebben (bijvoorbeeld bij banken) speelt het bedrijfsproces zich af in hoeveelheden en niet in geld. Daarom zal een rapportering in hoeveelheden veel directer en meer herkenbaar zijn; afwijkingen kunnen sneller en meer doelgericht worden geanalyseerd.

Het constateren van een afwijking van betekenis tussen de werkelijke en de gebudgetteerde cijfers schept een probleem dat, zoals alle problemen, op drie wijzen kan worden opgelost:

- bijstelling van de waarneming (perceptie): het beeld dat we hadden blijkt onjuist te zijn, omdat de geconstateerde afwijking berustte op een fout in de rapportering, of het gevolg was van een op korte termijn afgesproken reactie op een bijzondere storing of andere incidentele gebeurtenis.
- bijstelling van de realiteit door passende maatregelen
- bijstelling van het oorspronkelijke doel door verandering van de taken.

De rapporten aan de leidinggevende niveaus zullen naast de hoeveelheden ook de kostenbedragen bevatten, omdat de financiële gevolgen van afwijkingen op dat niveau bekend moeten zijn. Ten aanzien van de inhoud van de rapportering aan de managers (bedrijfsleiders, afdelingchefs, en dergelijke) kan worden gesteld dat deze afhankelijk zijn van de hen opgedragen taken.

We *illustreren* dit met de rapportering aan de technische (onderhouds-)dienst op grond van het in de voorgaandeparagraaf gegeven *voorbeeld*:

Stel dat in het budget voor een bepaalde machine op grond van de gekozen onderhoudsmethode en de daarbij behorende oorzakelijke verbanden de onderhoudsuren zijn bepaald op:

$$10 + (0,04 \times \text{machine-uren})$$

hetgeen bij 1.000 verwachte machine-uren resulteerde in:

$$10 + (0,04 \times 1000) = 10 + 40 = 50 \text{ onderhoudsuren.}$$

Nemen we aan dat het tarief van de onderhoudsdienst Hfl 60,- bedraagt, dan zijn de te verwachten onderhoudskosten in het komende jaar:

$$50 \text{ uren} \times \text{Hfl } 60,- = \text{Hfl } 3.000,$$

Na afloop van de budgetperiode blijkt het *werkelijk* aantal machine-uren 1.200 te zijn en de *werkelijke* onderhoudskosten 70 uren \times Hfl 60,- = Hfl 4.200,

Hoe wordt deze afwijking nu gerapporteerd aan respectievelijk de technische (onderhouds-)dienst (TD) en aan de desbetreffende productie-afdeling (PA) ?

Geval I: De verantwoordelijkheid voor het aantal onderhoudsuren berust bij de TD:

Rapport aan de TD:

Bestede onderhoudstijd:	70 uur à Hfl 60, = Hfl 4.200, –
Toegestaan en aan de PA doorbelast: 10 + (0,04 X 1200) =	58 uur à Hfl 60, = Hfl 3.480, –
Afwijking: negatief	Hfl 720, –

Rapport aan de PA:

Door TD belaste onderhoudstijd:	58 uur à Hfl 60, = Hfl 3.480, –
Uit activiteiten h = gedekte onderhoudstij	58 uur à Hfl 60, = Hfl 3.480, –
Afwijking:	Hfl 0

Opmerking: Een afwijking wijst niet altijd op onjuiste beslissingen, doch kan ook zijn veroorzaakt door voorvallen van buiten die niet, of niet onmiddellijk, ongedaan konden worden gemaakt door tegenmaatregelen.

Geval II: De verantwoordelijkheid voor het aantal onderhoudsuren berust bij de PA:

Rapport aan de TD:

Bestede onderhoudstijd	70 uur à Hfl 60, = Hfl 4.200, –
Aan PA doorbelast	70 uur à Hfl 60, = Hfl 4.200, –
Afwijking:	Hfl 0

Rapport aan de PA:

Door TD belaste onderhoudstijd	70 uur à Hfl 60, = Hfl 4.200, –
Uit activiteiten gedekte onderhoudstijd	58 uur à Hfl 60, = Hfl 3.480, –
Afwijking: negatief	12 uur à Hfl 60, = Hfl 720, –

In beide gevallen zal de TD verantwoordelijk zijn voor het kostenbedrag *per uur*, dat in dit voorbeeld zowel in het budget als in de realiteit Hfl 60, – is. In het eerste geval zal de TD de afwijking in de uren moeten verklaren, in het tweede geval de PA. Uiteraard zal in de praktijk veelal een min of meer gedeelde verantwoordelijkheid bestaan, zodat men in samenwerking moet zoeken naar een oplossing van het probleem dat door de afwijking wordt gesteld.

Zoals uit de beschrijving van budget en rapportering bleek, zijn de daarin vermelde kosten op administratieve wijze berekend.

Zo zullen de afschrijvingskosten afhangen van de levensduurklasse, de afschrijvingsmethode en de vervangingswaarde (de huidige aanschaffingsprijs/nieuwswaarde) van de bedrijfsmiddelen.

Bij de beslissingscalculatie, waarvan in eerdere paragrafen sprake was, zal men uit-

gaan van de *toekomstige waardevermindering* van de machine:

Stel een machine is administratief ingedeeld in de levensduur-klasse van 10 jaar. De vervangingswaarde is Hfl 100.000, – , de restwaarde na 10 jaar is nul en de afschrijvingsmethode is lineair (elk jaar eenzelfde deel).

De afschrijvingskosten in het budget zullen dan zijn:

10 % van Hfl 100.000, – = Hfl 10.000, Bij een beslissing bijvoorbeeld aangaande de vervanging van deze machine nu of over een jaar moet men uitgaan van de vermindering in de opbrengstwaarde. Wanneer de opbrengst in het komende jaar naar verwachting zal dalen van Hfl 25.000, – naar Hfl 20.000, – dan is de financiële invloed gelijk aan de waardevermindering van het bezit, zijnde: 25.000 minus 20.000 = Hfl 5.000, – en niet de Hfl 10.000, – die als afschrijvingskosten worden opgenomen in de administratie.

Het begrip ‘kosten’ verschilt van inhoud naar gelang het doel waarvoor het gebruikt wordt en dit is soms oorzaak van ernstige fouten. In de *budgettering* en de *rapportering* neemt men de kosten op die bij aankoop in het heden zouden worden gemaakt, omdat men uitgaat van de continuïteit (voortbestaan) van het bedrijf. Aan het einde van de levensduur van de bedrijfsmiddelen wil men immers in staat zijn om tot vervanging over te gaan om het bedrijf in stand te houden. Bij een *beslissing* is er sprake van een gedeeltelijke discontinuïteit; men gaat na welke alternatieven er zijn en men is niet gebonden aan bepaalde continuïteiten. Zo zal men bij de overweging om een bepaald artikel uit het assortiment te verwijderen niet uitgaan van de continuïteit van dat artikel, maar van de continuïteit van het *bedrijf*. De continuïteit van het bedrijf is het best gewaarborgd als de som van de netto-ontvangsten en de waardevermeerdering van de bezittingen maximaal is.

Indien de bedoelde machine bestemd is om dat artikel te maken zal men bij de beslissingscalculatie niet uitgaan van de op continuïteit gebaseerde afschrijvingskosten van Hfl 10.000,-, maar (voor het komende jaar) op de waardevermindering ad Hfl 5.000,- en mede op grond daarvan het besluit nemen om het artikel al of niet te handhaven.

Samenvatting

Kosten ontstaan door uitgaven en door afnemning van de waarde van de bezittingen of activa van het bedrijf. Bij de besluitvorming wordt alleen gelet op *toekomstige* uitgaven en *toekomstige* daling van de opbrengstwaarde van de activa.

Nadat de besluiten zijn genomen zal men verder budgetteren en rapporteren op grond van de normen die in de administratie bestaan, bijvoorbeeld ten aanzien van de afschrijvingskosten.

Kosten kunnen op verschillende wijze worden ingedeeld:

- naar de soorten produktiefactoren, waardoor ze worden veroorzaakt;
- naar de functie waarvoor de produktiefactoren worden opgeofferd;
- naar de oorzaak van hun ontstaan: capaciteit of activiteit;
- naar de plaats in de organisatie;
- naar de drager van de kosten;
- naar de fase van de levenscyclus.

De technische (onderhouds-)dienst zal op de hoogte moeten zijn van de kosten om in staat te zijn steun te verlenen aan beslissingen inzake bedrijfsmiddelen op lange, middellange en korte termijn. Het criterium bij deze beslissingen is de verkrijging van de benodigde prestatie-eenheden tegen minimale toekomstige kosten. Daarbij moet de technische (onderhouds-)dienst op de hoogte zijn van de levenscyclus van de produkten en van de bedrijfsmiddelen.

De optimalisatie mag niet betrekking hebben op onderhoudskosten in engere zin, doch op *alle* kosten die gemaakt zullen worden om de prestatie-eenheden te verkrijgen. Het is nadelig voor het bedrijf indien een deel van de kosten wordt benadrukt, hetzij de investeringskosten, hetzij de onderhoudskosten.

De budgettering zal geschieden op basis van afgesproken hoeveelheden en causale verbanden.

De rapportering zal de werkelijke cijfers geven, waarbij de verantwoordelijkheid van de budgethouder de inhoud van de rapportage bepaalt. Door analyse van de afwijkingen met het budget wordt het bedrijf beheersbaar.

Enkele principes uit de conventionele voorraadbeheersing

13

Prof.ir. W. Monhemius

De conventionele theorie van voorraadbeheersing is in veel opzichten ontoereikend voor de voorraadbeheersing in het onderhoud. Toch wil ik de aandacht vestigen op enkele principes uit deze theorie ten behoeve van de gevallen waarin ze wel toepasbaar zijn. Ik zal mij beperken tot het bespreken van de beginselen van het kiezen van de structuur van bestelmethode en de bepaling van bestelniveaus respectievelijk bestelseries.

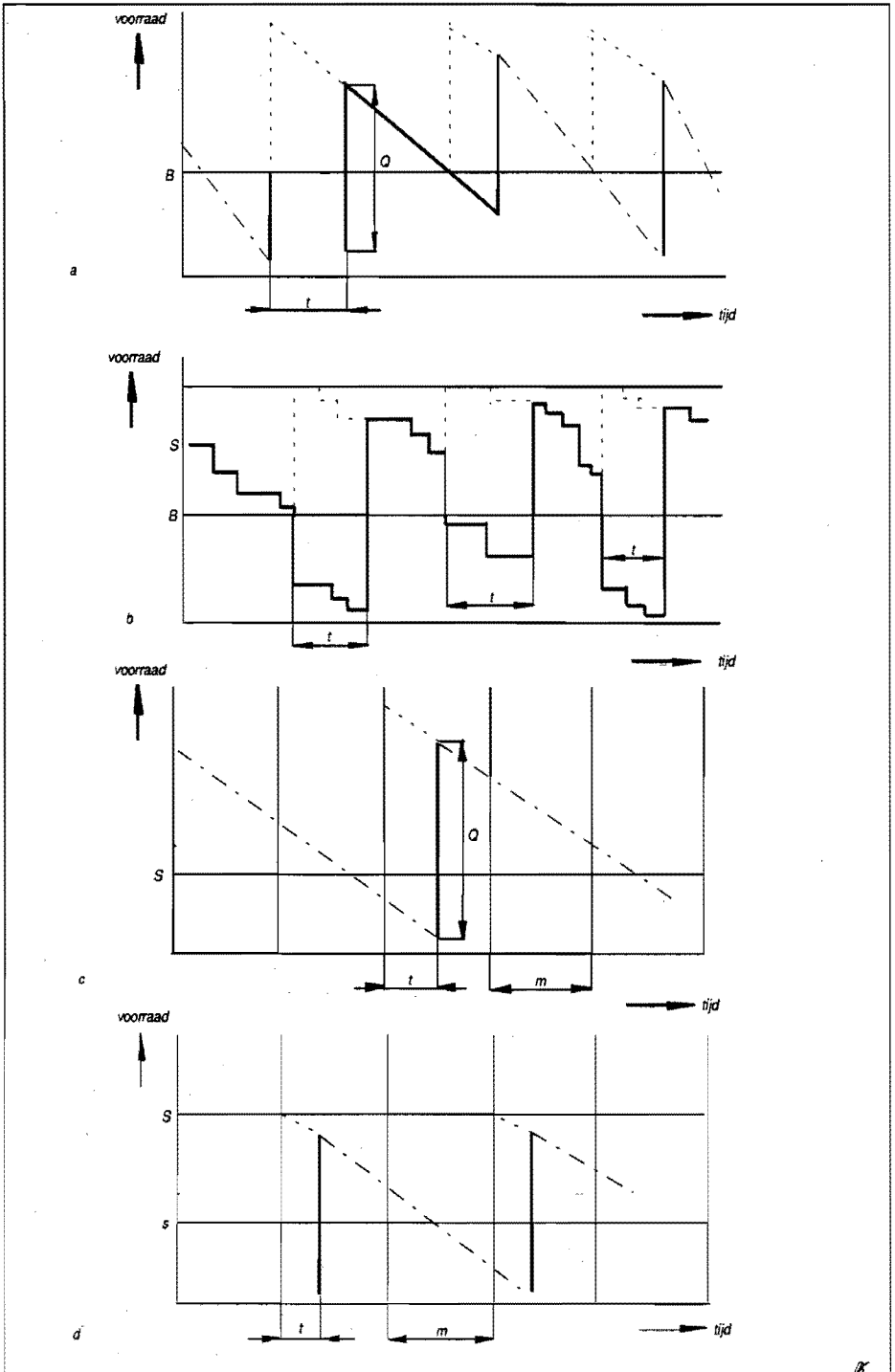
Dat betekent dat ik een aantal onderwerpen in het geheel niet behandel, zoals de principes van voorspellen van de vraag met behulp van extrapolatiemethoden ofwel univariate methoden, de berekeningen als hulp bij de beslissing om een bepaald artikel op een bepaalde plaats wel of niet op voorraad te leggen, de meer geavanceerde systemen zoals METRIC, en het ABC principe.

De beschikbare ruimte kan mijns inziens beter worden gebruikt om de principes te bespreken die ten grondslag liggen aan berekeningen per voorraadpost en voor het totale assortiment voorzover het over bestelseries en veiligheidsvoorraden gaat.

1. De vorm van bestelregels

Er zijn twee categorieën bestelregels in de conventionele theorie: de *programma-bestuurde* en de *voorraadbestuurde*. Alleen de laatste categorie lijkt in dit verband interessant en wordt hieronder besproken.

In de literatuur^{4,10} kan het volgende worden gevonden: de beslissingsregels voor voorraadbeheersing bij levering uit voorraad blijken in hoofdzaak in vier groepen te kunnen worden ingedeeld op grond van twee criteria (zie tabel 1):



Figuur 1 Vier grondvormen van bestelregels

1. kunnen op elk moment bestellingen worden geplaatst of bestaat de mogelijkheid daartoe slechts periodiek ?
2. als een bepaald artikel wordt besteld, wordt dan de te bestellen serie mede bepaald op grond van de economische voorraad die op het moment van bestellen aanwezig is of niet ?

	Bestelserie onafhankelijk van economische voorraad op moment van bestellen	Bestelserie afhankelijk van economische voorraad op moment van bestellen
Doorlopend mogelijkheid tot bestellen	(B, Q)-methode	(B, S)-methode
Periodiek mogelijkheid tot bestellen	(s,Q)-methode, waarbij de serie voor meer dan één interval de afname dekt	(s,S)-methode en diverse varianten daarop
	Methode van de 'run-out-list'	Periodiek aanvullen als speciaal geval van (s,S)

Tabel 1. Overzicht van beslissingsregels bij productie op voorraad

Economische voorraad is de voorraad, die in het magazijn is (technische voorraad) plus wat bij de leverancier is besteld maar nog niet ontvangen, minus dat wat door de klanten reeds is gereserveerd voor een toekomstige periode ter lengte van de levertijd van de leverancier.

In figuur 1 zijn de vier groepen regels in beeld gebracht.

Hierbij is elke voorraadpost afzonderlijk bekeken. Aan deze groepen regels kan nog een vijfde worden toegevoegd, die naar voren komt als men een geheel assortiment in een bepaald magazijn bekijkt. Indien een groot aantal voorraadposten wordt aangevuld door bestellingen bij dezelfde leverancier, kan het verstandig zijn deze bestellingen te koppelen. Indien voor ten minste één voorraadpost moet worden besteld, wordt nagegaan voor welke verwante posten het doelmatig is om meteen ook te bestellen. De totale hoeveelheid, die dan wordt besteld, kan òf worden bepaald met de optelsom van de hoeveelheden per afzonderlijke voorraadpost òf een vaste hoeveelheid zijn, bijvoorbeeld uitgedrukt in m^3 of in productie-uren, die dan door een toewijzingsregel wordt verdeeld over de verschillende voorraadposten. In dit verband worden de begrippen 'run-out-list'^{6,7,10}, 'can order point'^{7,8} en 'toewijzingsprobleem'⁴ wel gebruikt. Zij worden hier niet nader besproken.

De criteria, die een rol spelen bij de keuze van de vorm van bestelregels, zijn vooral^{4,10}:

- is een continue bestelmogelijkheid wel of niet realiseerbaar?
- de technische mogelijkheid om de relevante informatie op het bestelmoment ter beschikking te hebben

- zijn er technische redenen voor een vaste bestelhoeveelheid ?
- het kosten-aspect.

Dit gezichtspunt komt nader aan de orde bij de volgende twee onderwerpen. Vooral is van belang dat een (s,S)-regel gewoonlijk een langere reactietijd heeft dan een (B,Q)-regel.

Tenslotte zij vermeld dat in geval van het aanwezig zijn van een keten van opeenvolgende voorraadpunten nog speciale vormen van bestelregels aan de orde komen. Met name zij gewezen op het 'basestocksystem'^{5,6,7,8} dat hier niet zal worden besproken

2. De keuze van de seriegrootte

- *Overzicht mogelijke gevallen*

Bij de bepaling van de bestelserie of afroepserie (niet te ver warren met jaarserie) is de vraagstelling in feite: welke investering in voorraad men kan en wil plegen, om de kosten van bestellen te verlagen. Men moet daarbij nooit vergeten dat er vaak ook andere methoden zijn om de bestelkosten te verlagen, zowel per keer als per jaar.

Zowel in voorraadbestuurde als programmabestuurde systemen doet zich het probleem voor van de keuze van de seriegrootte. De navolgende behandeling van dat probleem is gebaseerd op hoofdstuk 11 uit Brown⁷.

Sinds 1914 zijn vele formules ontwikkeld die, onder verschillende omstandigheden, kunnen gelden voor de optimale bestelserie of produktieserie. Men kan de veronderstellingen, die moeten worden gemaakt, indelen in vijf typen. Zij betreffen:

a. *de bestelkosten resp. omstellkosten*

Het bepalen daarvan is in de praktijk moeilijk en vereist goed bedrijfs-economisch inzicht. In de modellen onderscheiden wij twee gevallen:

- onafhankelijk van de wijze waarop een combinatie met andere voorraadposten plaatsvindt
- afhankelijk daarvan (bijvoorbeeld door bestelling bij dezelfde leverancier).

b. *het afname patroon*

Hoe wordt het produkt uit de voorraad gehaald ? In de modellen onderscheiden we vijf gevallen:

- afname constant, continu, tevoren bekend
- afname is een stochast, kansverdeling is bekend
- afname is tevoren bekend, maar verschilt sterk van periode tot periode (zoals bijvoorbeeld bij gebruik van MRP [E:Material Requirements Planning] bij fabrieksvoorraden)

- er is grote kans op onverwacht incourant worden
- de laatste serie. Deze mogelijkheid voor kopen respectievelijk fabriceren is de laatste.

c. de kosten per stuk

Voor het bepalen hiervan is goed bedrijfs-economisch inzicht vereist. In de modellen onderscheiden we drie gevallen:

- constant
- er bestaat quantum-korting
- voor de volgende serie zullen de kosten per stuk hoger zijn.

d. het aanvoerpatroon

In de modellen onderscheiden we drie gevallen:

- aanvoersnelheid oneindig groot
- aanvoersnelheid niet oneindig groot
- aanvoerpatroon is gecoördineerd met het afnamepatroon (zoals bijvoorbeeld bij gebruik van MRP).

e. voorraadkosten

In de modellen onderscheiden we twee gevallen:

- kosten van rente en ruimte worden samen opgevoerd als een percentage van het geïnvesteerde bedrag
- rente en ruimte worden apart behandeld.

Ook hier geldt weer dat het bepalen van ruimtekosten en vereiste rentabiliteit goed bedrijfs-economisch inzicht vereist.

Het is duidelijk dat per combinatie van veronderstellingen een formule of een algoritme kan worden bepaald. Ter illustrati zal ik hier drie gevallen behandelen.

– *Standaardgeval*

Kiest men voor elk type veronderstelling het eerste geval en gebruikt men een (B,Q)regel dan kan de formule van Camp (of Wilson, of Harris) worden afgeleid:

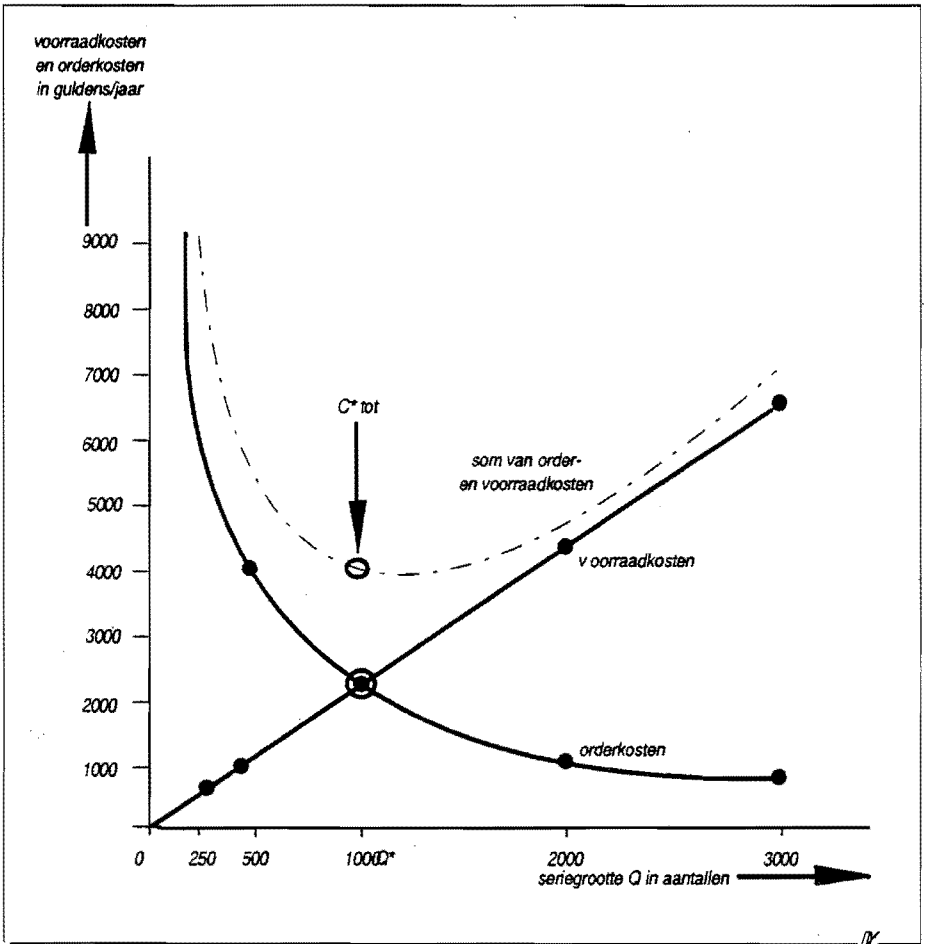
$$Q^* = \sqrt{\frac{2DF}{I}} \quad (\text{zie figuur 2})$$

Q^* = optimale serie in stuks

D = jaarlijkse afname in stuks

F = bestelkosten in guldens per keer

I = kosten van voorraadhouden in guldens per produkt per jaar



Figuur 2. Totale beïnvloedbare kosten als functie van Q^*

Voorts geldt: $C^* = \sqrt{(2DFI)}$

C^* – laagst bereikbare waarde van de beïnvloedbare kosten per jaar.

Gelukkig blijkt het resultaat vrij ongevoelig te zijn voor afwijkingen van de theoretisch optimale Q . Indien men kiest:

$$Q = pQ^* \text{ dan is } C = C^* \frac{1}{2} \left(p + \frac{1}{p} \right)$$

P = te kiezen constante.

Brown geeft als vuistregel dat afrondingen, waarbij $0,7 < p < 1,4$ in de praktijk toelaatbaar zijn.

Wel is het zo, dat er bijna altijd voor Q bepaalde onder- en bovengrenzen zijn, bijvoorbeeld:

- indien men werkt met een (s,S)-regel met een bestelinterval van 4 weken, dan moet Q uiteraard bedragen:

$$Q > \frac{4}{50} D$$

- indien boven een bepaalde ligduur het produkt kan bederven levert dat een bovengrens op, uitgedrukt in tijd.
- *Wisselwerking tussen seriegrootte en veiligheidsvoorraad*

Het eenvoudigste geval van dit type doet zich voor als van het standaardgeval alleen wordt afgeweken door voor het afnamepatroon de tweede veronderstelling te maken: de afname is een stochast, de kansverdeling van de afname over een periode ter lengte van de levertijd is bekend.

In een (B,Q)-regel zal dan gewoonlijk een veiligheidsvoorraad groter dan nul worden gekozen. Bij de berekeningen ontstaat nu een complicatie omdat in het wiskundig model de beïnvloedbare jaarlijkse kosten tegelijkertijd een functie zijn van zowel de seriegrootte als de veiligheidsvoorraad⁵. Brown⁷ geeft echter een vuistregel die vaak een goede benadering is en de berekening aanzienlijk vereenvoudigt:

- bereken eerst de seriegrootte Q volgens CAMP
- alleen indien $Q < \sigma$ is correctie nodig wegens de genoemde wisselwerking. Daarbij geldt σ = standaarddeviatie van de kansverdeling van de voorspelfout, bij het voorspellen van de behoefte over een periode ter lengte van de levertijd
- de correctie kan worden uitgevoerd met de meer exacte rekenwijze, maar een goed bruikbare benadering is: neem Q in dat geval gelijk aan σ .

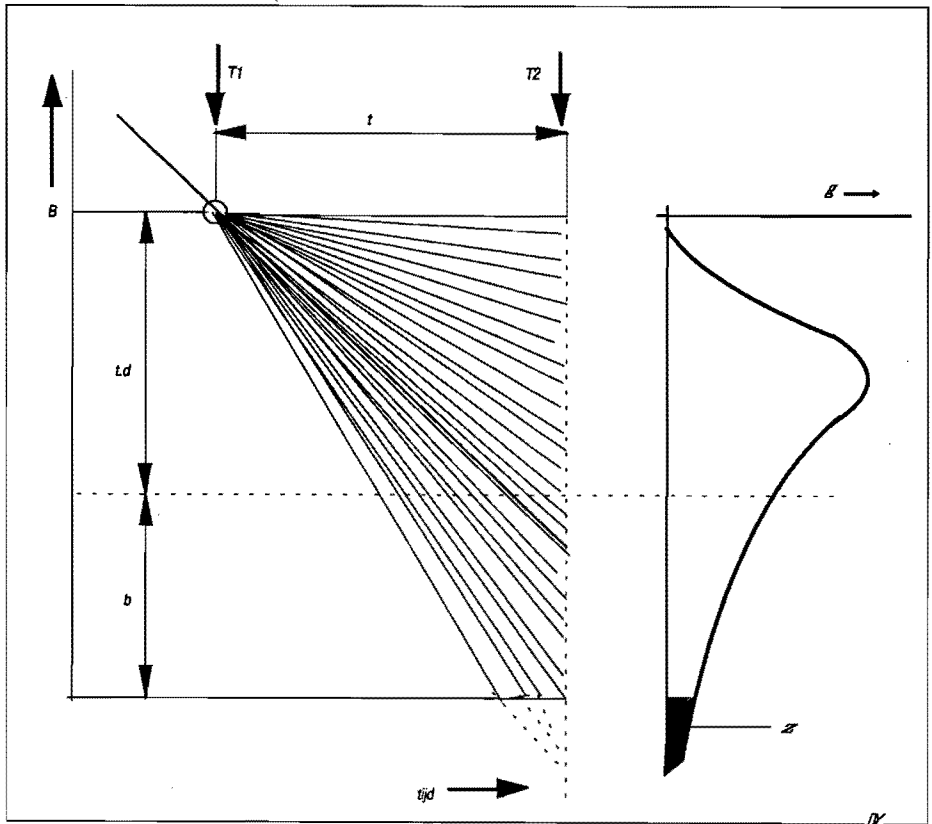
Brown geeft als ervaringsfeit, dat de correctie eigenlijk alleen voorkomt bij grote waarde van de afname in aantal stuks. Of dat juist is, heb ik niet voor alle waardebereiken geverifieerd. Zie⁵ blz.302.

- *Gezamenlijk bestellen bij één leverancier*

Het eenvoudigste geval van dit type is de situatie waarin de afwijking van het standaardgeval alleen daarin bestaat dat de structuur van de bestelkosten er anders uitziet:

F = bestelkosten in guldens per keer dat men een bestelling doet (bestaande uit een aantal regels voor verschillende voorraadposten) bij een leverancier

f = kosten per extra regel op de order. Het voert te ver, formule en afleiding hier te behandelen. Deze zijn vermeld in⁷ paragraaf 11.7.



Figuur 3. Verband tussen bestelniveau en veiligheidsvoorraad

3. De keuze van de veiligheidsvoorraad

Bij voorraadbestuurde systemen wordt de veiligheidsvoorraad gewoonlijk gedefinieerd als de hoeveelheid stuks die aanwezig is op het moment dat de bestelde hoeveelheid aankomt. De (algebraïsch) geniddelde veiligheidsvoorraad is dus de voorraad die op dat moment gemiddeld genomen aanwezig is. Bij een (B,Q) systeem bestaat het bestelniveau uit:

- het voorspelde verbruik tijdens de levertijd
- de veiligheidsvoorraad (v.v).

Er is onzekerheid omdat het werkelijke verbruik tijdens de levertijd in het algemeen een kleinere of grotere afwijking zal vertonen van het voorspelde gebruik. De veiligheidsvoorraad is de buffer die die afwijking moet opvangen. Bij het bepalen van de veiligheidsvoorraad gebruiken we een schatting van de kansverdeling van die afwijking (de 'voorspelfout'). De standaarddeviatie van die ver-

deling noemen we in deze paragraaf kortweg σ . Om σ te kunnen bepalen, moet de levertijd bekend zijn.

Indien wij de veiligheidsvoorraad bepalen als $k * \sigma$ moeten daarvoor bekend zijn:

- de aangenomen kansverdeling voor de voorspelfout
- de gewenste service.

Het is in principe mogelijk om per voorraadpost een 'optimale' servicegraad te berekenen; dat gebeurt echter zelden.

In Van Hees en Monhemius⁵ worden gammaverdelingen gebruikt ter benadering van bedoelde kansverdeling. Brown⁷ stelt dat het over het algemeen voldoende is als men kan kiezen uit slechts twee verdelingen: de normale en de exponentiele. In verkooppunten, van waaruit aan de uiteindelijke consument wordt geleverd, zal men veelal erg scheve verdelingen aantreffen. De exponentiele verdeling is dan een goede benadering.

In centrale nationale magazijnen zal men vaker verdelingen aantreffen die op een normale verdeling lijken. De verbruikte aantallen per levertijd zijn hoger omdat de levertijden voor zo een magazijn gewoonlijk langer zijn en omdat van daaruit aan vele gespreide verkooppunten wordt geleverd.

Om de gewenste service vast te leggen, bestaan verschillende maatstaven. Ik zal hier twee behandelen.

Servicegraad A (Lewis: 'Vendor service level'⁹) kan worden gedefinieerd als:

- de kans per aanvullingsbestelling dat aan de *gehele* ontvangen vraag kan worden voldaan voordat de bestelde aanvullingsserie binnenkomt. Anders gezegd:
- de kans dat de veiligheidsvoorraad > 0 is als de aanvullingsbestelling binnenkomt.

Deze definitie van servicegraad is vooral van belang voor een fabrieksvoorraad met onderdelen, halffabrikaten, componenten, die aan een volgende afdeling moeten worden geleverd. Indien men daar namelijk ziet aankomen, dat men dreigt buiten voorraad te raken, zal men meestal proberen dat alsnog te vermijden. Men gaat in de fabriek gericht chasseren, en prioriteit geven aan de fabricageorders die het eerste nodig zijn. Men is daarom vooral geïnteresseerd in het aantal *keren* per jaar dat een order moet worden gechasseerd.

Servicegraad B (Lewis: 'customer service level'⁹; Canals: 'leveringsgraad'¹⁰) kan worden gedefinieerd als:

- de procentuele verhouding tussen de bestellingen (in aantal of in geld) waaraan direct kan worden voldaan (levering uit voorraad) en het totaal aantal bestellingen (in aantal of in geld).

Deze definitie van servicegraad is vooral van belang voor een commerciële voor-

raad van eindprodukten, die aan de consumenten worden geleverd en waar chasseren van toelieferingen niet gebeurt of erg duur is.

Voorbeeld

Nu zal worden nagegaan hoe bij een gegeven waarde van k de servicegraad volgens beide definities kan worden berekend.

Stel: voorspelfouten normaal verdeeld

$$D = 10.000 \text{ stuks / jaar}$$

$$Q = 895 \text{ stuks}$$

$$vv = 735 \text{ stuks dus } k = \frac{735}{875} = 0,84$$

$$\sigma = 875 \text{ stuks.}$$

Servicegraad A

$$F(k) = \int_k^{\infty} f(x)dx$$

waarin x = de voorspelfout gedurende de levertijd in aantal malen σ .

$$N.F(k) = \text{aantal keren 'buiten voorraad' per jaar waarin } N = \frac{D}{Q}$$

$$F(k) = 0,2005, \text{ afgerond } 20 \% \text{ (uit tabel, zie appendix)}$$

$$N.F(k) = \frac{10000}{895} \times 0,2005 = 2,24 \text{ keren / jaar.}$$

Servicegraad B

$$E(k) = \int_k^{\infty} (x) f(x) dx \quad (\text{'partial expectation'})k$$

$\sigma^* E(k)$ = verwachte hoeveelheid stuks, niet uit voorraad geleverd, per cyclus

$$E(k) = 0,11196 \text{ (uit tabel, zie appendix)}$$

$$E(k) = 97,97$$

$$\sigma E(k) = 97,97$$

$$\frac{\sigma E(k)}{Q} = \frac{97,97}{895} = 0,1095, \text{ afgerond } 11\%.$$

Tenslotte noem ik enkele van de denkbare beslissingsregels om voor een heel assortiment voorraadposten per voorraadpost de waarde van k te bepalen (dus de veiligheidsvoorraad te distribueren):

1. alle voorraadposten dezelfde leveringsgraad B
2. minimaliseer de totale hoeveelheid niet uit voorraad geleverd (per jaar en in geld uitgedrukt)
3. alle voorraadposten dezelfde k
4. alle voorraadposten evenveel weken voorraad
5. minimaliseer de totale hoeveelheid te chasseren orders (per jaar).

Veel belangrijker dan verfijningen in de berekening van de relatie tussen servicegraad en veiligheidsvoorraad, is de keuze van de beslissingsregel uit bovenstaande verzameling.

Brown geeft de formules die bij elk van de regels horen. Zij zijn alle zeer eenvoudig. Men kan aantonen dat regel 2 overgaat in regel 3, indien N voor alle voorraadposten dezelfde waarde heeft. Brown stelt dat regel 2 vooral is aan te bevelen voor de voorraadpunten van waaruit aan de uiteindelijke klant wordt geleverd. Regel 5 zou vooral van toepassing zijn op fabrieksvorraden of centrale nationale magazijnen.

Uit het voorgaande volgt dat behalve de keuze van de totaal te investeren hoeveelheid geld in veiligheidsvoorraden per voorraadpost de volgende informatie nodig is:

- de verwachte waarde van het verbruik gedurende de levertijd
- de waarde van σ .

Deze kan worden bepaald door een van de volgende methoden:

- wetmatigheden voor het gehele assortiment, zoals het vaak aanwezige verband tussen gemiddeld verbruik per tijdseenheid en σ
- het bijhouden en extrapoleren per voorraadpost
- de theoretische relatie zoals in de Poissonverdeling
- de kansverdeling van de voorspelfout.

4. Gebruik van speciale tabellen voor bestellen van reserve onderdelen

In⁵ wordt een overzicht gegeven van speciale tabellen zoals die omstreeks 1970 in gebruik waren bij Philips Bedrijfsmechanisatie, Unilever¹¹ en de National Coal Board (UK).

Om dergelijke tabellen te kunnen opstellen is het uiteraard nodig eerst aannamen te doen omtrent een of meer van de volgende variabelen:

- de vereiste servicegraad

- de kansverdeling van de vraag of van de voorspelfouten
- de bestelkosten
- de kosten van voorraadhouden
- soms zelfs de kosten van buiten voorraad raken.

Literatuur

1. E.G.F.van Winkel en D.J.Fraser *Tijdreeksvoorspellingen en hun bewaking*, Samsom Uitgeverij, Alphen aan den Rijn 1970
2. C.New Requirements planning (App.1) Grower Press 1973, Repr,1978
3. C.D.Lewis, Scientific inventory control (Ch.2) Butterworths 1970
4. R.N.van Hees en W.Monhemius, *Productiebesturing en Voorraadbeheer* Deel I Algemene beginselen Centrex 1964
5. R.N.van Hees en W.Monhemius, *Productiebesturing en Voorraadbeheer* Deel II Theoretische achtergronden, Kluwer Deventer 1970. Beide delen bij McMillan in Engelse vertaling verschenen in 1972
6. J.F. Magee en D.M.Boodman *Production and inventory control*, McGraw Hill sec.ed.1967
7. R.G.Brown, *Materials Management Systems*. Wiley 1977
8. R.Peterson en E.A.Silver. Decision systems for inventory management and production planning, Wiley 1979
9. C.D.Lewis *Demand analysis and inventory control*, Saxon House 1978
10. P.M.T.Canals e.a.(red.) *Handboek goederenstroombesturing*. Hoofdstuk Voorraadbeheer door P.M.T.Nanals, Samsom Uitgeverij, Alphen aan den Rijn 1980
11. H.Bosch *Optimaal voorraadniveau van reserve-onderdelen*. Sigma 7 (1961) no 1 pag 9

Appendix

Exhibit D.4	Rational	Approximation	to the Normal	Distribution
Safety factor K	Density P(k)	Partial Probability P(k)	Partial expectation E(k)	expectation E(-k)
0.00	0.3989	0.5000	0.3989	0.3989
0.10	0.3970	0.4606	0.3509	0.4509
0.20	0.3910	0.4215	0.3067	0.5067
0.30	0.3814	0.3832	0.2664	0.5664
0.40	0.3683	0.3458	0.2299	0.6299
0.50	0.3521	0.3099	0.1971	0.6971
0.60	0.3332	0.2756	0.1679	0.7679
0.70	0.3123	0.2431	0.1421	0.8421
0.80	0.2897	0.2128	0.1194	0.9194
0.90	0.2661	0.1848	0.0998	0.9998
1.00	0.2420	0.1591	0.0829	1.0829
1.10	0.2179	0.1359	0.0684	1.1684
1.20	0.1942	0.1151	0.0561	1.2561
1.30	0.1714	0.0967	0.0457	1.3457
1.40	0.1497	0.0806	0.0369	1.4369
1.50	0.1295	0.0666	0.0297	1.5297
1.60	0.1109	0.0546	0.0236	1.6236
1.70	0.0940	0.0444	0.0186	1.7186
1.80	0.0790	0.0358	0.0146	1.8146
1.90	0.0656	0.0286	0.0113	1.0113
2.00	0.0540	0.0227	0.0086	2.0086
2.10	0.0440	0.0178	0.0065	2.1065
2.20	0.0355	0.0139	0.0049	2.2049
2.30	0.0283	0.0107	0.0036	2.3036
2.40	0.0224	0.0082	0.0027	2.4027
2.50	0.0175	0.0062	0.0019	2.5019
2.60	0.0136	0.0047	0.0014	2.6014
2.70	0.0104	0.0035	0.0010	2.7010
2.80	0.0079	0.0026	0.0007	2.8007
2.90	0.0060	0.0019	0.0005	2.9005
3.00	0.0044	0.0014	0.0004	3.0004
3.10	0.0033	0.0010	0.0003	3.1003
3.20	0.0024	0.0007	0.0002	3.2002
3.30	0.0017	0.0005	0.0001	3.3001
3.40	0.0012	0.0003	0.0001	3.4001
3.50	0.0009	0.0002	0.0001	3.5001
3.60	0.0006	0.0002	3.6000	
3.70	0.0004	0.0001	3.7000	
3.80	0.0003	0.0001	3.8000	
3.90	0.0002	3.9000		
4.00	0.0001	4.0000		

DEEL B

DE BEDRIJFSDIAGNOSE EN OPLOSSING VAN LOGISTIEKE PROBLEMEN BIJ PRODUKTIEBEHEERSING, VOORRAADBEHEERSING EN ONDERHOUDSBEHEERSING IN DE PRAKTIJK

Inleiding

De artikelen in dit subdeel van het boek hebben betrekking op de productie-beheersing in vier verschillende bedrijven. De artikelen zijn alle ontleend aan afstudeerprojecten van afstudeerders van de vakgroep Kwantitatieve Aspecten van Beheersingssystemen (KBS) van de faculteit Technische Bedrijfskunde. De eindredactie van elk der artikelen is tot stand gekomen onder verantwoordelijkheid van dhr. Igel, docent van de bovengenoemde vakgroep.

De artikelenreeks beoogt een overzicht te geven van de toepassing en toepasbaarheid van de productiebeheersingstheorie en moderne productiebeheersingsconcepten in zeer verschillende bedrijfssituaties, en met betrekking tot vier verschillende aspecten van de productiebeheersing.

Het eerste artikel laat zien hoe in een typisch procesgewijs fabricerend bedrijf de productiebeheersingsproblematiek kan worden geanalyseerd naar knelpunten, en hoe we tot een verstandig beheersingsconcept kunnen komen. Verschillende en grote omsteltijden in verschillende produktiefasen spelen hier een rol, en de kernvraag is of deze produktiefasen nauw op elkaar moeten aansluiten, of dat er enige afstand in de tijdplanning nodig is voor een adequate besturing.

Het tweede artikel gaat in op de problematiek rond de selectie van het materials handling systeem in een grote bloemenveiling. Het artikel laat zien hoe een analyse in de goederenstroom in het kader van een besturingsconcept leidt tot eisen te stellen aan het materials handling systeem i.e. de transport-, opslag- en sorteermiddelen.

De confrontatie van deze eisen met de kenmerken in de markt beschikbare middelen resulteert in een concept-ontwerp.

Het derde artikel behandelt de problematiek van de stuklijst kwaliteit in een bedrijf dat seriematig complexe producten maakt met regelmatige wijzigingen in de stuklijsten ten gevolge van produktwijzigingen. De bedrijfsfunctie die 'verantwoordelijk' is voor de kwaliteit van deze stuklijsten heet configuratie management. De eisen die vanuit verschillende bedrijfsfuncties worden gesteld aan de stuklijst, en de daarbij behorende stuklijstvarianten worden behandeld.

Verder wordt aangegeven welke de knelpunten zijn bij de bestaande wijze van beheersen van de stuklijstkwaliteit. Vervolgens wordt een methode gepresenteerd om de configuratie te checken op gebruikskwaliteit voor de verschillende bedrijfsfuncties, en de kwaliteit uit te drukken in een kwaliteitscijfer.

Er is een procedure ontwikkeld voor verbetering van de kwaliteit op basis van deze kwantitatieve registratie.

Het vierde artikel gaat in op de beheersingsproblematiek in een bedrijf dat in grote volumes een groot assortiment enkelvoudige producten maakt uit een beperkt aantal uitgangsmaterialen. De fabricage bestaat uit een aantal productiefasen.

Aan de orde is de vraag hoe de leverbetrouwbaarheid voor alle of een deel van de producten kan worden verhoogd, met behoud van de hoge capaciteitsbezetting. Deze vraagstelling wordt geanalyseerd aan de hand van de regelmaat in de vraag naar de verschillende producten, de commonality van halffabrikaten en de variaties in capaciteitsbezetting en doorlooptijden van de verschillende productie-eenheden in het bedrijf.

De analyse leidt tot de aanbeveling met betrekking tot de inrichting van de productie, en plaatsing van het klantorderontkoppelpunt voor verschillende produktgroepen en de klantorderacceptatie.

Orderproductie in de procesindustrie

15

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. A.H.S.M. Linders en samengevat en bewerkt door M. Igel

1. Bedrijf en opdrachtformulering

In de jaren zeventig werd in de EEG een chemisch bedrijf gevestigd dat, onder andere, uit styreen batchgewijs polystyreen produceert.

De productiecapaciteit van polystyreen is 55.000 ton per jaar. In het betreffende bedrijfsdeel werken ongeveer 150 mensen, waarvan 80 in de productie. De productie vindt 365 dagen per jaar, 24 uur per dag plaats.

Het bedrijf heeft in Europa op de markt voor PS en TPS een marktaandeel van 1 à 2 %. Het grootste gedeelte van het styreeraanbod gaat niet via de vrije markt, maar wordt verwerkt door de geïntegreerde fabrikanten of via lange termijncontracten.

Medio 1988 was de vraag naar polystyreen groter dan het aanbod. In een dergelijke situatie bestellen de klanten verder vooruit dan de gegarandeerde twee of drie weken levertijd.

De situatie van tekort aan polystyreen sloeg begin 1988 om in een situatie van overschotten.

Ook de prijs van styreen varieert, voornamelijk op kleine schommelingen in het aanbod of de vraag.

Voor de productie van styreen wordt gebruik gemaakt van grote installaties. Er bestaan maar 20 tot 30 van deze (storingsgevoelige) installaties; het bouwen ervan vergt een zeer grote investering en duurt 2 tot 3 jaar.

De opdrachtformulering luidde als volgt:

Analyseer de logistieke besturing en geef mogelijkheden aan ter verbetering. Hierbij moet vooral gekeken worden naar:

- het plannen van de productie
- het afwegen van het aantal malen omstellen tegen voorraad kosten en levertijd
- verlaging van de voorraden grondstoffen.

2. Het produkt

Polystyreen bestaat uit een vloeibaar olieproduct, styreen.

Door middel van een chemische reactie worden styreen-moleculen met elkaar verbonden tot lange ketens en ontstaat opolystyreen.

Door de procesinstellingen te veranderen kan de lengte van de molecuulketens gevarieerd worden en daarmee de produkteigenschappen van de verschillende typen polystyreen.

Een andere mogelijkheid om verschillende produkteigenschappen te verkrijgen is het toevoegen van voornamelijk rubber en pentaan.

Het produktenpakket is te verdelen in drie groepen:

– *Normaal polystyreen (PN)*, een directe polymeer van de grondstof styreen. Het product is glashelder en bros en wordt onder andere gebruikt voor de doosjes voor compact-discs.

In deze groep wordt een aantal standaardtypen op voorraad geproduceerd en een aantal speciale typen op order.

De tien standaardtypen en de speciale typen produceert men batchgewijs. De PN-productie is ongeveer 17.000 ton per jaar.

– *Slagvast polystyreen (PS)* Aan deze polymeer is rubber toegevoegd, waardoor het produkt steviger en slagvaster wordt. Het wordt onder andere gebruikt om koelkastonderdelen te maken. Voor buitentoepassingen zoals tuinmeubelen wordt het product (SSun) gebruikt met een andere soort rubber. In deze groep produceert men vier standaardtypen en een aantal speciale typen. Alle produkten worden batchgewijs geproduceerd. De PS-productie is ongeveer 30.000 ton per jaar.

– *Schuimpolystyreen (EPS)* Aan de polymeer wordt een drijfgas toegevoegd, waardoor de klant het product met stoom kan opblazen tot 40 maal het oorspronkelijke volume. Hierdoor ontstaat materiaal, gebruikt voor isolatie en verpakking. Deze groep valt weer uiteen in de groepen SR, SF, SD en SRF. De EPS-productie is ongeveer 75.000 ton per jaar.

Bij het analyseren van de kostprijzen vallen een aantal zaken op. De grondstofkosten vormen 80-90% van de kostprijs. De kosten van styreen bedragen, afhankelijk van het produkt, 65-90% van de kostprijs.

Naast styreen gebruikt men nog vijftig grondstoffen, die op een paar na een klein aandeel in de kostprijs hebben, behalve rubber en pentaan. Uit de analyse van de kostprijs blijkt dat in de procesindustrie kapitaalintensiviteit niet gepaard hoeft te gaan met een grote toegevoegde waarde.

Terminologie

Alvorens verder te gaan moeten een aantal begrippen worden verklaard:

Een *voorraadprodukt* is een standaardprodukt, dat in een standaardverpakking op voorraad wordt gehouden. Daarbij geldt dat een standaardprodukt ook geleverd kan worden in verschillende verpakkingen.

Een *orderprodukt* wordt op order geproduceerd omdat het in grote hoeveelheden wordt verkocht.

Een *speciaalprodukt* heeft speciale eigenschappen en wordt altijd op order geproduceerd.

De *levertijd* van voorraadprodukten is twee weken en van de orderprodukten en standaardprodukten in niet-standaardverpakking drie weken.

Het bedrijf richt zich voornamelijk op de specialiteiten.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van een sterk punt binnen de organisatie, de flexibiliteit, die te danken is aan de relatief lage omstelkosten van een batchgewijze produktie. De concurrenten hebben continue produktieprocessen met veel hogere omstelkosten.

De ordergrootte varieert van minder dan 1 ton tot 200 ton; de gemiddelde ordergrootte is ongeveer 10 ton. Grote orders worden in partijen afgeleverd.

In dit rapport wordt verder alleen ingegaan op de batchgewijze fabricage van PN- en PS-producten.

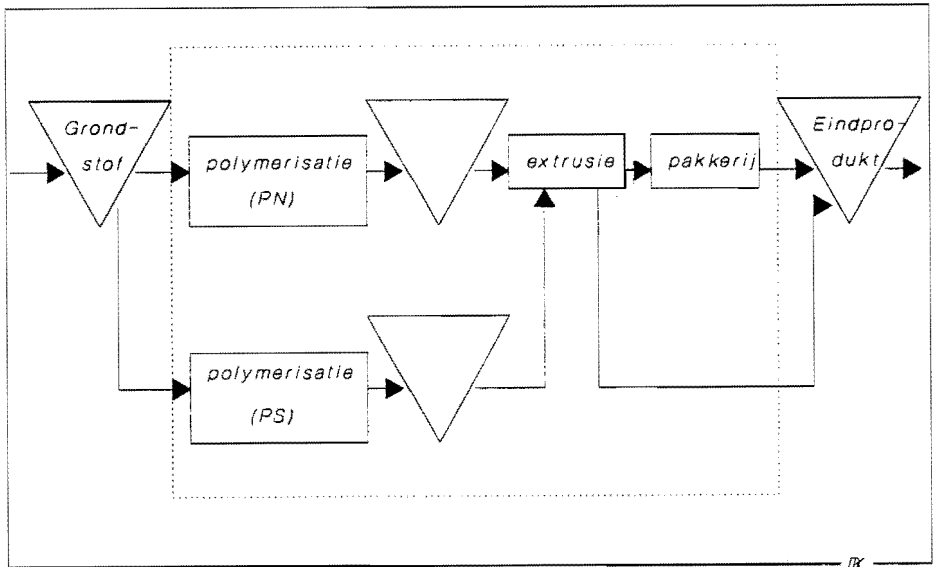
3. Het produktieproces

– De goederenstroom

In figuur 1 is de goederenstroom weergegeven; daarin zijn drie hoofdstromen te onderscheiden:

- de continue produktie van een aantal standaard PS-typen
- de batchgewijze produktie van PS- en TPS-produkten in de polymerisatie-afdeling en de extrusie-afdeling
- de produktie van EPS in de EPS-polymerisatie en de zeverij, met daarin de bewerkingen: *polymerisatie*, *extrusie* en *verpakken*.

In de pakkerij, die werkt voor alle processen, worden de produkten die niet worden verpakt, als bulk afgeleverd. De produktieprocessen vallen onder de verantwoordelijkheid van drie afdelingen: de polymerisatie, de extrusie en de pakkerij.



Figuur 1. De goederenstroom

– De polymerisatie-afdeling

De polymerisatie-afdeling heeft de beschikking over zeven reactoren voor de PS- en TPS-productie:

- twee reactoren voor PN, elk met een capaciteit van 15.000 ton per jaar.
- vijf reactoren voor PS, van 10.000 ton per jaar.

In de polymerisatie-afdeling produceert men vijf soorten PNbeads, (1N, 2N, 3N, 4N, 5N) en drie soorten PS-beads (1S, 2S en SS). Beads zijn korreltjes polystyreen.

De productie van PS heeft plaats in één productie-straat, bestaande uit twee reactoren, één wachttank en één droger.

Het is mogelijk om de productiecapaciteit van PN uit te breiden met twee PS-reactoren (zie figuur 2).

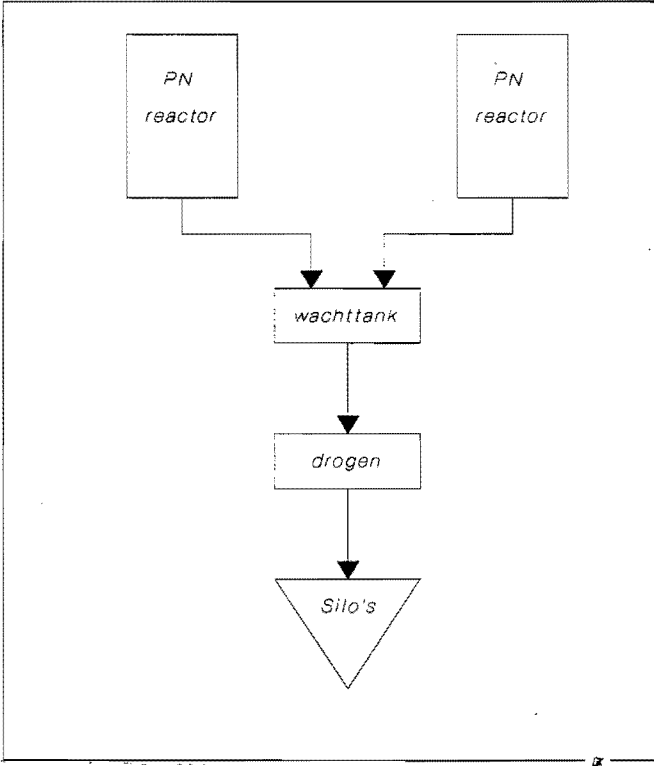
De styreen wordt in de reactor omgezet in korreltjes polystyreen (genoemd: beads). Deze omzetting duurt 8-10 uur per lading.

Na het afkoelen wordt de reactorinhoud in de wachttank geleegd en vervolgens in de droger gedroogd.

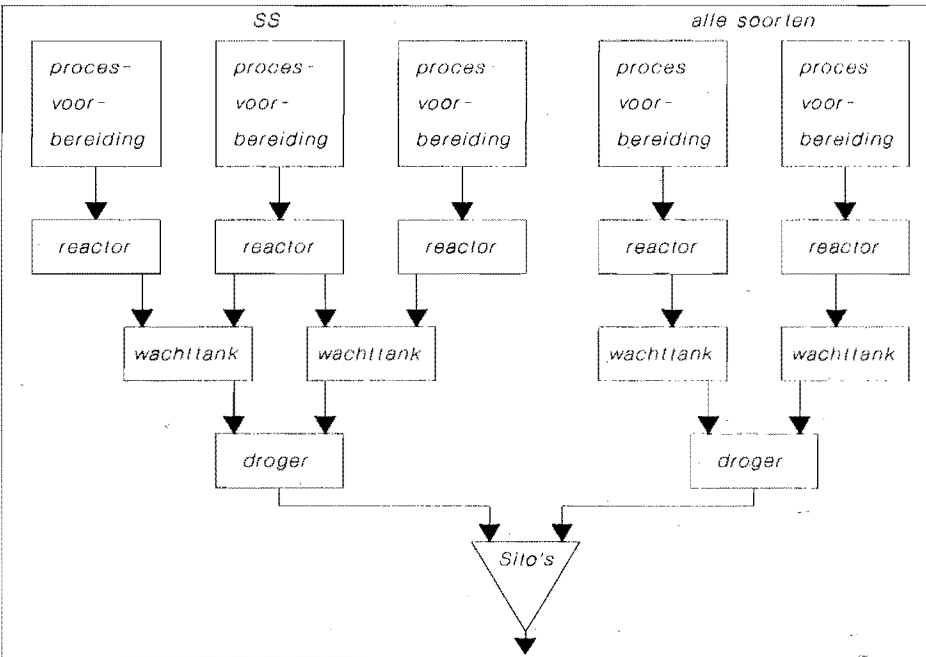
De verschillende soorten beads ontstaan door verschillende pro cescondities en toevoeging van verschillende grondstoffen.

De PS-beads worden in twee straten gepolymeriseerd.

In een straat wordt type SS geproduceerd, in de andere straat 1S, 2S en SS. Figuur 3 toont hoe hier het productieproces verloopt.



Figuur 2. Het productieproces voor PN-beads



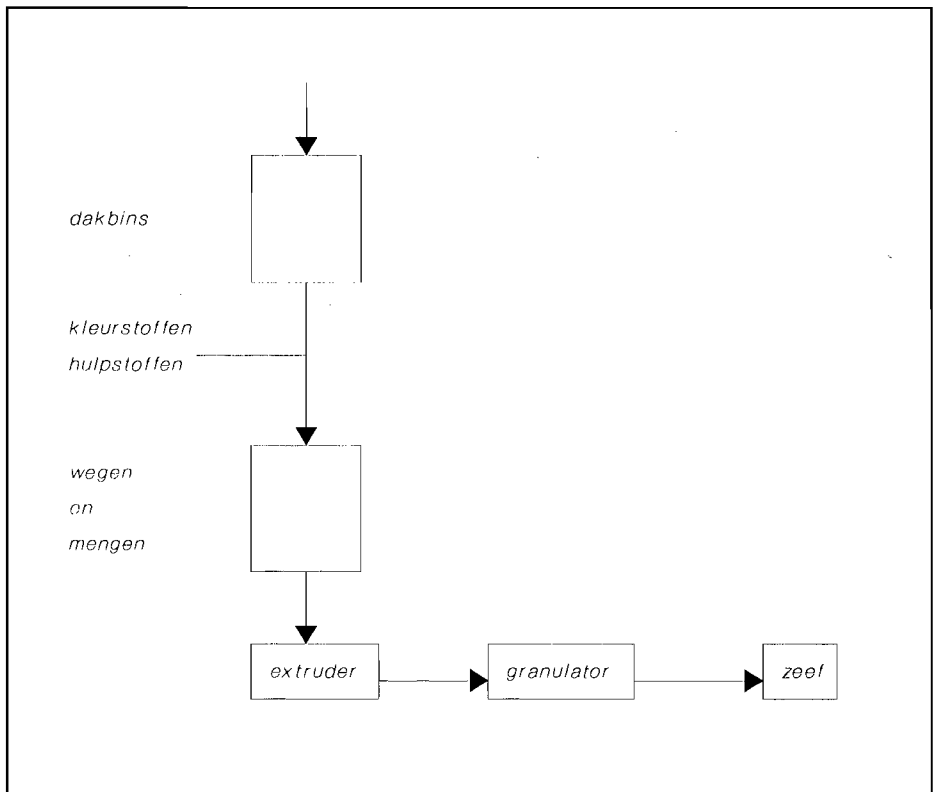
Figuur 3. Het productieproces voor PS-beads

In de oplosreactoren wordt rubber opgelost. Deze oplossing gaat naar de voorpolymerisatiereactor, waar styreen wordt toegevoegd. Hierna gaat het produkt naar de reactor. De procestijd van de reactor is bepalend, 4-8 uur per lading. Twee reactoren van de produktiestraat, die bestaat uit drie reactoren, kunnen worden ingezet voor de productie van PN.

De gangbare soorten PN- en PS-beads, die van de polymerisatieafdeling afkomen worden opgeslagen in tien grote silo's, elk met een capaciteit van 250 ton. Beads, die niet veel voorkomen, worden opgeslagen in zes kleinere silo's van 60 ton.

– *De extrusie-afdeling*

De extrusie-afdeling krijgt acht soorten beads toegeleverd die worden verwerkt tot ongeveer 80 eindproducten (zie figuur 4)



Figuur 4. Het productieproces in de extrusie

Vanuit de silo's worden de beads via leidingen getransporteerd naar bins van 7-8 ton, die op het dak van de extrusie-afdeling staan.

Om een bepaald produkt te maken, moeten de hiervoor benodigde beads-soorten in weegpannen, in de juiste verhoudingen, worden gemengd waarna ze met andere grondstoffen, en eventuele kleurstoffen, in de menger worden gevoerd. In de menger wordt het geheel tot een homogene massa gemengd. Daarna wordt de menger in de opslaghopper geleegd. Vanuit de hopper gaat het mengsel naar de extruder. In de extruder wordt het mengsel verwarmd, zodat een stroperige massa ontstaat.

Deze massa wordt door gaatjes geperst, waardoor draden ontstaan die door een waterbad worden geleid om weer hard te worden. De draden gaan hierna in een granulator, die de draden in stukjes hakt. Met een zeef worden vervolgens de te grove stukken en het stof verwijderd.

Voor de produktie zijn de extruders bepalend; er zijn vijf extruders beschikbaar. De extrusie-afdeling heeft de beschikking over drie silo's van 100 ton, waarin een gedeelte van de produktie kan worden opgeslagen. Vanuit deze silo's wordt het produkt naar de pakkerij vervoerd.

– De pakkerij

In de pakkerij verwerkt men de produktie uit de extrusieafdeling en de produktie uit de continufabriek. De pakkerij beschikt over zes silo's van 30 ton, om de produkten van de extrusie-afdeling in te ontvangen.

Het product kan dan nog op verschillende manieren worden verpakt of verladen: in standaardzakken of als bulk.

Het verpakken van het product in zakken gebeurt door een afzakinstallatie. Het verloop van de goederenstromen van en naar de pakkerij is weergegeven in figuur 5.

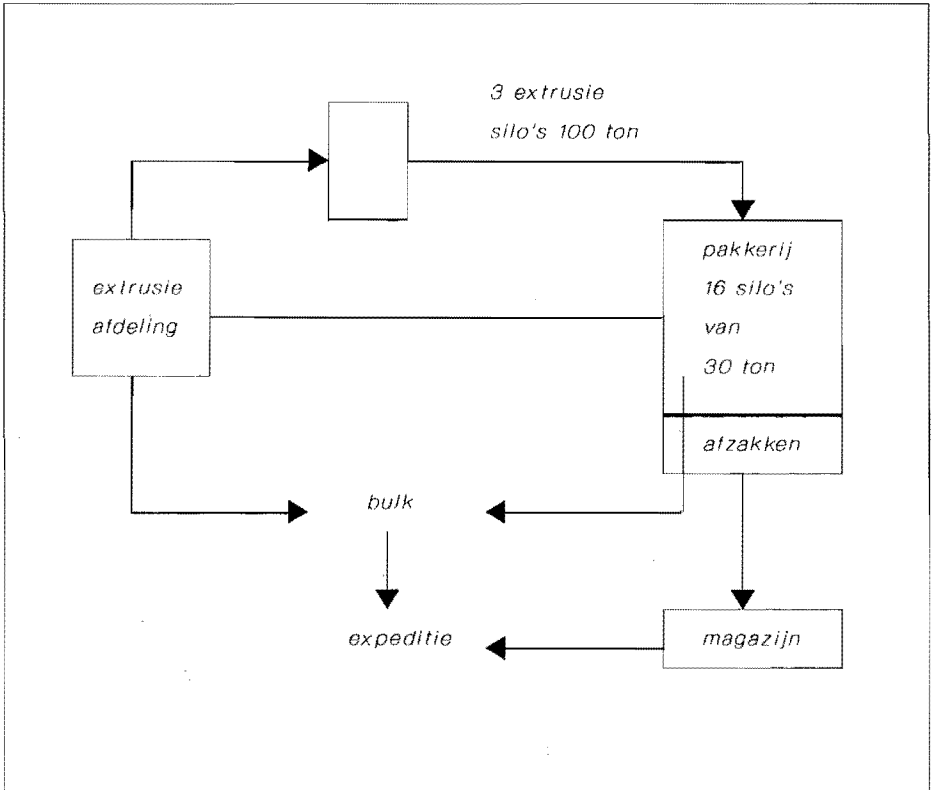
4. Produktie- en opslagcapaciteiten

De beschikbare opslagcapaciteit per beadssoort is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Beschikbare opslagcapaciteit

<i>beadssoort</i>	<i>opslagcapaciteit</i>
PN	6 X 50 ton 2 X 250 ton
PS	4 X 50 ton 2 X 250 ton

In de polymerisatie is de reactor-capaciteit het knelpunt.



Figuur 5. De goederenstroom in de pakkerij

Wordt echter de extrusie-afdeling bij het overzicht betrokken, dan is deze afdeling het knelpunt.

In de extrusie-afdeling zijn de extruders het knelpunt.

Tabel 2 geeft een overzicht van de productie-capaciteit. De capaciteiten van de afzonderlijke extruders staan in Tabel 3. De capaciteit van de afzakinstallatie van de pakkerij is ongeveer 80.000 ton/jaar in tweeploegendienst.

Tabel 2. Jaarcapaciteit voor de productie van PN en PS

<i>installatie</i>	<i>PN</i>	<i>PS</i>
polymerisatie	30.000 ton	50.000 ton
extrusie	55.000 ton	

Tabel 3. Capaciteit van de extruders

<i>extruder nr.</i>	<i>capaciteit ton/jaar</i>
1	10.000
2	5.000
3	15.000
4	15.000
5	10.000

5. Omstel- en voorraadkosten

Als er in de polymerisatie-afdeling een straat moet worden om gesteld, dan moeten de wachttanks en de droger worden schoongemaakt. Dit duurt ongeveer vier uur. Het overzetten van een reactor van PN naar PS en omgekeerd duurt ongeveer vijftien uur. Door vaker om te stellen, is het mogelijk om met een kleinere voorraad beads te werken. Er is capaciteit voldoende, echter, het is wel belangrijk, dat de extrusie-afdeling te allen tijde kan blijven doorwerken. Daar ligt namelijk het knelpunt.

De extruders moeten vrij veel worden omgesteld. Het schoonmaken van de weegpan en de menger vergt geen extra tijd. De tijd voor het schoonmaken van de extruder is afhankelijk van de soort overgang. Blijft men binnen dezelfde groep, dan kost het omstellen de minste tijd. Overgangen van kleur naar kleurloos en omgekeerd, en van N of S naar SS of omgekeerd, duren weer veel langer dan van S naar N (en omgekeerd). De omsteltijden in de extrusie-afdeling zijn weergegeven in Tabel 4.

Een uur omstellen kost ongeveer f 248, - .

In de extrusie-afdeling produceerde men de standaardproducten in series van 55 ton; van de orderproducten wordt precies de bestelde hoeveelheid geproduceerd. Het omstellen van de afzakinstallatie duurt 15 tot 20 minuten, het schoonmaken van een APK-silo vijf kwartier.

Tabel 4. Extrusie-omsteltijden in uren

<i>van/naar</i>	<i>S</i>	<i>N</i>	<i>SS</i>	<i>kleur</i>
S	1	2	8	8
N	2	1	8	8
SS	8	8	1	8
kleur	8	8	8	4

De voorraadkosten per ton per jaar worden geschat op f 500, - .

6. Besturing van de goederenstroom

– *Productiebesturing*

Het productiebureau is verantwoordelijk voor de productiebesturing.

In de aangetroffen situatie stelde de planner van de afdeling logistiek aan het begin van elke maand een maandplan op. Hij ging hierbij uit van prognoses, orders, voorraden, historische afnamegegevens en aanwezige capaciteit.

Voor PN respectievelijk PS kwamen hierin alleen de totale te produceren hoeveelheden voor. Het maandplan werd de hele maand niet herzien.

De geplande hoeveelheden beads uit het maandplan werden omgerekend in de benodigde hoeveelheden grondstoffen voor de komende maand. Hieruit ontstond het *maandinkoopplan*, waarin rekening werd gehouden met de aanwezige grondstofvoorraden.

De planner trachtte bij de orderacceptatie een zo realistisch mogelijke leverdatum af te geven. Hij mistte daartoe echter de orderdatum en het overzicht, welke capaciteit nog vrij was in de extrusie-afdeling. Derhalve nam hij dagelijks de productie van de vorige dag en de voorraden in de silo's op.

Vervolgens werd met de extrusie besproken, welke orders geproduceerd moesten worden op de verschillende extruders en hoe deze producten moesten worden verpakt of opgeslagen.

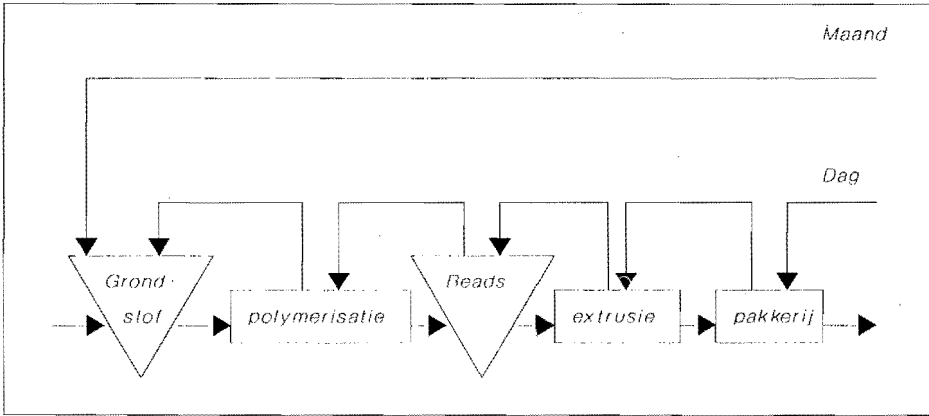
Hierna ging hij naar de polymerisatie om te kijken of daar problemen waren. Na het eind van zijn ronde legde de planner de afspraken vast.

Een duidelijk verband tussen het maandplan en de dagelijkse productiebesturing ontbrak. Bij het dagelijkse plannen van voorraadproducten werd uitgegaan van batches van 50 ton, waarin de standaardproducten in de extrusie-afdeling werden geproduceerd; dit was tevens een volle silo in de pakkerij.

Het produkt werd vervolgens in zakken gedaan, tenzij er een order was voor een bulkclading.

De orderproducten hadden een levertijd van drie weken. Van deze producten produceerde men precies de gevraagde hoeveelheid. Als er voor een orderprodukt meer orders waren, dan produceerde men deze orders in één serie.

Voor de polymerisatie-afdeling plande de planner de beadssoorten in, waarvan de silo's bijna leeg waren, rekening houdend met het productieprogramma in de extrusie. De hiervoor beschreven wijze van plannen in polymerisatie en extrusie is schematisch weergegeven in figuur 6.



Figuur 6. De aangetroffen wijze van productiebesturing

Ook de pakkerij kreeg dagelijks de van de planner een planningslijst, waarop was aangegeven wat er met de producten moest gebeuren. Verpakte voorraadproducten werden tenslotte opgeslagen in het magazijn gereed product.

Aangezien men in het APK niet continu werd gewerkt, was het zaak om op tijd voldoende silo's leeg te hebben om de in het weekend geëxtrudeerde producten op te kunnen slaan.

– *Voorraden en disposities.*

Ten aanzien van de voorraden bleek het volgende:

- de voorraden standaardproducten bij de N-typen variëerde rond de 25 en bij de S-typen rond de 50 dagen
- de voorraad orderproducten was opvallend hoog; deze producten worden op order geleverd, zodat hier hoogstens een voorraad aanwezig mocht zijn die nodig is om het product te ontvangen en op transport te stellen
- de voorraad, uitgedrukt in verbruiksdagen, was voor alle typen groter dan de tijd tussen twee produktieruns.

Bij de dispositiegroep van de afdeling logistiek, de expeditie bekeek men elke dag welke orders waren binnengekomen. Samen met de planner werd dan gekeken of de leverdatum kon worden gehaald. Was dit niet het geval, dan gaf de planner een nieuwe leverdatum af.

Drie dagen voordat de order de deur uit moest, ging dispositie na of het product al aanwezig was of in de komende drie dagen door productie zou worden uitgeleverd. Was dit niet het geval, dan werd de planner gewaarschuwd die daarop de leverdatum inoverleg met de klant verschoof.

De doorlooptijd van een PN/PS order was in de aangetroffen situatie gemiddeld 25 dagen, variërend van 4 tot 140 dagen.

De produkten, waarvan geen voorraad aanwezig was, werden ongeveer vijf dagen voor uitlevering in productie genomen; de gemiddelde wachttijd van een order, alvorens te worden ingezet, was derhalve 20 dagen (uitlopend tot 135 dagen).

Vermoedelijk komt dit doordat men trachtte grotere series samen te stellen. De gegarandeerde levertijd was twee weken voor voorraadprodukten en drie weken voor orderprodukten.

7. Knelpunten analyse

De knelpunten, die vastgesteld zijn ten aanzien van productiebesturing zijn de volgende:

- bij het op voorraad produceren wordt geen gebruik gemaakt van een vraagvoorspelling in eindproducttypen. Derhalve konden veiligheidsvoorraadniveaus niet goed worden vastgesteld en was er geen koppeling tussen maandplan en dagelijkse productieplanning
- voor de grondstoffen heeft men bestelniveau en seriegrootte enkel geschat; deze schattingen zijn niet optimaal
- het beheersen van de tussen- en eindvoorraden is voornamelijk gebaseerd op het vol produceren van silo's in plaats van op verwachte afname en kostenafweging
- de capaciteitskosten worden, gezien de hoge investeringskosten, ten opzichte van de voorraadkosten wellicht overgewaardeerd.
Ter illustratie: een 10% lagere bezettingsgraad(voor het extra omstellen) komt bij 10% toegevoegde waarde overeen met 1% van de kostprijs; drie weken minder voorraad door kleinere series bij 90% materiaalkosten à 20% voorraadkosten per jaar komt eveneens overeen met 1% van de kostprijs. Dit nog afgezien van de grotere flexibiliteit als gevolg van de kortere produktieseries.
- te lange series en cycli in de extrusie met als gevolg grote voorraad te vroeg geproduceerde orderprodukten. Dit houdt verband met een planningdoorlooptijd van twintig dagen met het oog op serievorming
- in de pakkerij is onvoldoende silocapaciteit om de weekend productie op te slaan

De volgende knelpunten staan in verband met het *klantenorder-ontkoppelpunt* (KOOP).

Het KOOP in de goederenstroom scheidt het op klantenorder gerichte laatste stroomdeel van het prognose gestuurde eerste deel. Bij de voorraad produkten lag het KOOP bij de eindvoorraad, bij de orderprodukten bij de voorraad beads.

- voor de orderprodukten ligt het KOOP op eindprodukt-niveau hetgeen uit het oogpunt van diversiteit zeer ongunstig is. Gezien doorlooptijden en lever-tijden is dit ook niet nodig.
- de extrusie-afdeling is het knelpunt; het is ongunstig dat het knelpunt na het KOOP ligt. Het is daarom belangrijker dat de extrusie zo efficiënt mogelijk werkt, dan dat er kan worden doorgewerkt in de polymerisatie. Productie-series en -cycli in de extrusie zijn te groot.

Als oplossing voor de gesignaleerde knelpunten zal er in de volgende hoofdstukken een productiebesturingssysteem (PBS) voor batchgewijze productie van PN-/PS-produkten worden uitgewerkt.

Als uitgangspunten zijn hierbij gesteld:

- er moet rekening worden gehouden met een sterk wisselende marktsituatie
- ook in de toekomst zal men zich steeds meer richten op specialiteiten, gebruik makend van de aanwezige flexibiliteit.
- betrouwbaar leveren is van overwegend belang; snel leveren komt daarna op de tweede plaats
- kosten en opbrengsten zijn verder belangrijke afwegingscriteria.

8. Het productiebesturingsproces

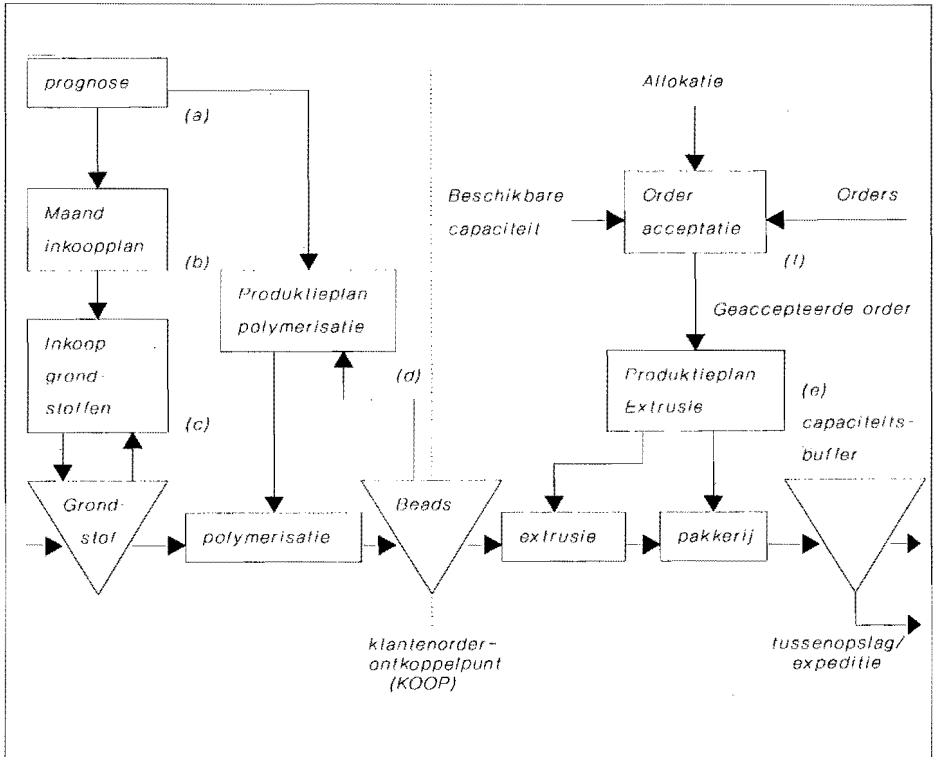
Het betreft hier de uitwerking van een productiebesturingssysteem (PBS) voor de batchgewijze productie van PN- en PS-produkten. Bij het kiezen van een oplossing is uitgegaan van de hier voorgenoemde knelpunten.

Deze kenmerken leiden naar een productiebesturingssysteem, waar bij het KOOP ligt bij de tussenvoorraad beads en in de extrusie voor alle produkten op order wordt geproduceerd.

In figuur 7 is het PBS schematisch weergegeven.

De functies van het PBS worden hieronder kort omschreven. De letters in de figuur komen overeen met die in de tekst:

- *Prognose (a)*; de geschatte behoefte aan beads per soort wordt door de planner bepaald
- *Maandinkoopplan (b)*; afgeleid van de voorspelde behoefte per beadssoort wordt door de planner vastgelegd, hoeveel er in de komende maand in de polymerisatie-afdeling wordt gebruikt van de belangrijkste grondstoffen
- *Inkoop grondstoffen (c)*; het gaat hier zowel om bestellen van grondstoffen uit het maandinkoopplan als het bestellen van de overige grondstoffen
- *Productieplanning polymerisatie (d)*; de polymerisatie moet op prognose worden bestuurd



Figuur 7. Het voorgestelde productiebesturingssysteem

- *Productieplanning extrusie en pakkerij (e)*; in de extrusieafdeling moet op order worden geproduceerd. Kleine schommelingen in de vraag naar capaciteit worden opgevangen door de capaciteitsbuffer. In het productieprogramma voor de extrusie-afdeling wordt aangegeven hoe de pakkerij de produkten moet verwerken
- *orderacceptatie (f)*; bij de orderacceptatie moet rekening worden gehouden met de beschikbare capaciteit in de extrusie-afdeling.

Aan het einde van elke dag moet de planner gaan kijken, welke orders die dag binnen gekomen zijn. Elke order plaatst hij in een overzicht in de periode, waarin deze moet worden afgeleverd.

Op deze wijze is het vrij eenvoudig om de bezettingsgraad in de komende twee weken te bepalen.

In het volgende wordt nader ingegaan op de functies d en e.

9. Orderproductie in extrusie en pakkerij

– Bezettingsgraad en doorlooptijd

In voorgaand hoofdstuk werd verondersteld, dat het mogelijk zou zijn om orderproductie toe te passen in de extrusieafdeling. Er bestaan in dat geval dus geen voorraadprodukten meer. Alvorens kan worden uitgewerkt hoe er moet worden gepland, zullen de begrippen bezettingsgraad, doorlooptijd, afnamevariatie en productiegroepen worden besproken.

Orderproductie kan alleen worden toegepast als de omsteltijden niet te veel capaciteit vragen. De bezettingsgraad wordt anders te hoog, waardoor de doorlooptijd toeneemt.

De bezettingsgraad (R) is de behoefte aan capaciteit, gedeeld door de beschikbare capaciteit in een bepaalde periode.

De doorlooptijd is dan:

$$DLT = E(v) + E(w)$$

$E(v)$ = de gemiddelde bewerkingstijd van een order, inclusief de steltijd.

$E(w)$ = de gemiddelde wachttijd van een order alvorens deze in bewerking wordt genomen. Voor $E(w)$ geldt volgens Pol laczek:

$$E(w) = \frac{R * (1 + C^2) * E(v)}{2 * (1 - R)}$$

Waarbij:

C = de spreiding in de bewerkingstijd gedeeld door de gemiddelde bewerkingstijd

R = bezettingsgraad

De formule van Pollaczek kan gebruikt worden om de reëel haalbare doorlooptijd in de extrusie-afdeling te benaderen. Hierbij wordt het voorgesteld, alsof de afdeling beschikt over één fictieve machine met een capaciteit, die even groot is als de vijf afzonderlijke machines, die er werkelijk staan, samen.

De gemiddelde seriegrootte is 36 ton met een spreiding van 37 ton. Bij een gemiddelde productie van 6, 3 ton per uur is de gemiddelde bewerkingstijd van een order ($E(v)$) 5, 7 uur en de spreiding in de bewerkingstijd 5, 9 uur.

Nu geldt $C = 5, 9 / 5, 7 = 1, 0335$.

(In tabel 5 is voor de verschillende bezettingsgraden op deze wijze de doorlooptijd bepaald.)

Tabel 5. Gemiddelde doorlooptijd bij verschillende bezettingsgraden

<i>bezettingsgraad</i>	<i>doorlooptijd (uur)</i>
0.80	24
0.90	53
0.95	112
0.99	584

Duidelijk is te zien dat als de bezettingsgraad stijgt boven de 95%, de doorlooptijd snel oploopt.

– *Productiebesturing in extrusie en pakkerij*

De produkten, die in de extrusie-afdeling worden geproduceerd zijn :

- kleurloze PN produkten (33% van de totale productie); zowel standaard- als niet-standaardprodukten
- kleurloze PS produkten (54% van de productie); zowel standaard als niet-standaard
- SS produkten (5% van de productie); uitsluitend niet-standaard.
- kleurprodukten; dit zijn gekleurde PN-, PS- of SS-produkten, in kleine hoeveelheden geproduceerd (4% van de totale productie), behalve een produkt voor polaroid dat tien maal per jaar in een serie van 140 ton wordt gemaakt. (totaal 3% van de productie)
- scrap; uitval dat verwerkt wordt tot kleerhangermateriaal in series van 200 ton (2% van de totale productie).

De genoemde produkten kunnen niet op alle lijnen worden geproduceerd. De verdeling van de produkten over de extruders, zoals die was, is in tabel 5 aangegeven met (in procenten) het capaciteitsbeslag.

Tabel 5. Verdeling van de produkten over de extruders

<i>extruder</i>	<i>produkten</i>	<i>cap/jaar</i>
1	Scrap 11%; PN en PS 89%	10.000 ton
2	Kleur 44%; QX 22%; PN en PS 34%	5.000
3	N en S 100%	15.000
4	SS 18%; PN en PS 82%	15.000
5	N en S 100%	10.000

Een run voor het polaroidprodukt (QX) blokkeert extruder 2 ongeveer tien dagen. Dit gaf problemen met het op tijd leveren van de kleurorders. Dit kan worden opgevangen door het produkt voor polaroid op extruder 1 te produceren. Op deze machine duurt een run maar vijf dagen. Om dit te kunnen, moet de zeef worden aangepast.

Scrap werd altijd in runs van 200 ton geproduceerd, terwijl de gemiddelde serie-grootte in de extrusie-afdeling 36 ton is. Extruder 1 is dan een hele week geblokkeerd.

Deze runs moeten dus worden verkort.

Omsteltijden spelen een grote rol bij het programmeren van de productie. In tabel 4 zijn de omsteltijden weergegeven.

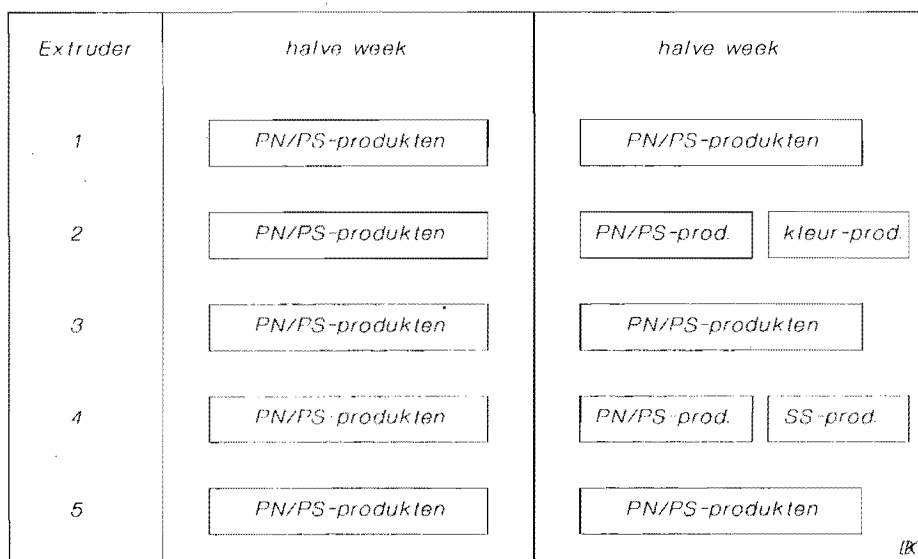
Uitgaande van een levertijd van twee weken, zou er wekelijks een productieprogramma voor de extrusie-afdeling kunnen worden opgesteld. Echter, in punt 1 is geschetst dat het bedrijf te maken heeft met een wisselende marktsituatie. In tijden van een vraagtekort eisen de klanten kortere levertijden voor PN- en PS-produkten dan de door BPM gehanteerde, twee weken. Er zou dus moeten worden gewerkt met een planningsinterval korter dan een week, omdat anders de gevraagde levertijden niet altijd kunnen worden gehaald. Daarom zal verder worden uitgegaan van een planningsinterval van een halve week en een vaste levertijd voor alle produkten van twee weken.

Indien men nu kan vaststellen welke produkten geproduceerd moeten worden dan kunnen met behulp van de in figuur 8 de omsteltijden per extruder worden bepaald.

Daartoe zijn van vijf weken de afgeleverde orders genomen en in overeenkomstige week-productieprogramma's gezet. Vervolgens zijn de omsteltijden bepaald. Per week is het aantal te produceren series gemiddeld 2x SS-, 3x kleur-, 5x PN- en 11x PS produkten. De totale omsteltijd is gemiddeld 57 uur per week, 7% slechts van de beschikbare capaciteit, met een spreiding van 6 uur. Hiervan wordt 17 uur veroorzaakt door SS-produkten en 24 uur door kleur-produkten. Deze produkten verbruiken samen echter maar 7% van de totale capaciteit.

Bij het inplannen moeten uiteraard de grote series (polaroid) QX en scrap zoveel mogelijk op de snelle machine 3 terecht komen en de kleine series op de langzaamste (2). Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de omsteltijden in de extrusie-afdeling zo weinig capaciteit vergen, dat het economisch verantwoord is op te produceren.

Als bovendien met een productie-cyclus van twee maal per week zou worden gewerkt dan zou men een levertijd van een week kunnen aanhouden. Bij omrekening van de gegevens van het hierboven gegeven gemiddelde weekpakket blijkt dat het verkorten van het planningsinterval als nadeel heeft, dat er 12 uur extra omsteltijd nodig is. Dit capaciteitsverlies is alleen merkbaar in geval van een vraagoverschot. De produktiecyclus van SS- en kleurprodukten zou daarbij op een week kunnen worden gehouden. De planning, zoals die nu ontstaat, is weer gegeven in figuur 8.



Figuur 8. Productiecycli bij een planningsinterval van van een halve week

De QX- en scrapp-series worden incidenteel ingepland. Meer omstellen heeft nog een nadeel; er ontstaat 700 ton meer scrapp in plaats van produkten, die verkocht worden in tijden van vraagoverschot. De voorraadkosten door het kortere planningsinterval worden daarentegen lager. Het totale voordeel per jaar is tenslotte begroot op f 100.000.

Gedurende de perioden dat er sprake is van een te grote vraag moet, om te kunnen leveren, gebruik kunnen worden gemaakt van een 'capaciteitsbuffer'.

Deze capaciteitsbuffer bestaat uit een voorraad van een zeer beperkt aantal typen die veel worden verkocht. De capaciteitsbuffer dient dus niet om orders uit voorraad te leveren en behoeft dus ook niet een groot assortiment aan voorraadprodukten te bevatten. Het is capaciteit, die op voorraad gelegd is.

Het cumulatieve overschot van de vraag ten opzichte van de productie bleek maximaal tot 400 ton op te lopen. Dit moet dan ook de maximale omvang van de buffervoorraad zijn.

De pakkerij tenslotte heeft meer dan voldoende capaciteit om de produktie te verwerken; echter, in het weekend wordt niet gewerkt. Er zijn twaalf silo's beschikbaar en dat is soms wel en soms niet genoeg. De silo-capaciteit vormt dus een bottleneck. De twee mogelijkheden om dit probleem op te lossen zijn:

- uitbreiden van het aantal silo's; dit vergt een grote investering
- op zaterdag een ploeg laten werken.

10. Produktieplanning in de polymerisatie-afdeling

Planning op twee niveau's

Uitgangspunt voor de methode van productieplanning in de polymerisatie-afdeling is het feit dat de polymerisatie overcapaciteit heeft ten opzichte van de extrusie en dat de mogelijkheid bestaat om reactorcapaciteit uit te wisselen tussen de diverse productiestraten (zie 4).

De planning van de polymerisatie-afdeling moet daarom in twee stappen plaats hebben:

- op het *eerste niveau* moet worden beslist, in welke produktiestraat de uit te wisselen reaktoren moeten worden ingezet. Deze beslissing wordt gebaseerd op de totale voorraad PN- respectievelijk PS-beads.
- op het *tweede niveau* moet worden beslist, welke beadseries in welke straat moeten worden geproduceerd. Deze beslissing wordt genomen aan de hand van de voorraden en de behoefte van de individuele soorten beads.

In tabel 7 is per beadssoort de gemiddelde afname, de spreiding in de afname en de beschikbare silocapaciteit aangegeven zoals die zijn bepaald over de afgelopen twaalf maanden.

Tabel 7. Afname aan beads door de extrusie-afdeling

<i>Beadssoort</i>	<i>gemiddelde afname/mnd</i>	<i>spreiding afname</i>	<i>silo-capaciteit</i>
1N	31 ton	20 ton	50 ton
2N	1.100 ton	234 ton	500 ton
3N	24 ton	14 ton	50 ton
4N	209 ton	81 ton	100 ton
5N	12 ton	13 ton	50 ton

1S	1.800 ton	265 ton	500 ton
2S	387 ton	52 ton	100 ton
3S	119 ton	38 ton	100 ton

– Planning op niveau 1

Momenteel is de vraag naar N- en S- beads respectievelijk 1400 ton en 2300 ton op maandbasis (tabel 7). Door twee reactoren (van 15.000 ton per jaar) in te zetten voor N, en vijf (van 10.000 ton per jaar) voor S, is de capaciteit 2500 ton N en 4200 ton S per maand.

Uitgaande van een normale verdeling van de vraag naar N kan worden aangetoond, dat de kans dat in een bepaalde maand de vraag groter is dan de capaciteit, slechts 0,1% is.

Op dezelfde wijze is vastgesteld dat de kans, dat de S-vraag groter is dan de capaciteit, nihil is. Voorlopig zal er dus weinig capaciteit behoeven te worden gewisseld tussen de N- en de S-straten.

De tijd, die nodig is om een reactor om te zetten van PN naar PS en omgekeerd is vijftien uur.

– *Planning op niveau 2*

De beslissing, welke soorten beads worden geproduceerd, moeten worden genomen aan de hand van de voorraad en de verwachte afname met behulp van een soort B, Q bestelsysteem.

B is het bestelniveau. Daalt de voorraad beneden dit niveau dan moet een serie Q besteld worden. B bestaat uit de verwachte afname gedurende de levertijd van Q en een veiligheidsvoorraad. De veiligheidsvoorraad is afhankelijk van de variatie van de afname gedurende de levertijd. Het omstellen voor een nieuwe serie kan drie dagen duren; er is voldoende capaciteit in de polymerisatie-afdeling.

De 1N-, 3N en 5N-beads hebben een geringe onregelmatige afname (zie tabel 7), omdat deze soorten alleen worden gebruikt voor enkele niet-standaard-producten. Voor elk van deze soorten is alleen een kleine silo van 50 ton beschikbaar, hetgeen de omvang van de aanvulserie beperkt.

De 4N-beads worden verwerkt in een paar standaardproducten; de afname van deze soorten is vrij constant (zie tabel 8).

Tabel 8. Bestelniveau en seriegrootte

Beads	B	Q
1N	25 ton	16 ton
2N	200 ton	max
3N	25 ton	16 ton
4N	60 ton	100 ton
5N	25 ton	16 ton
1S	300 ton	max
2S	80 ton	100 ton
3S	30 ton	60 ton

De 2N-beads hebben een zeer grote afname en wordt daarom geproduceerd zodra er maar even capaciteit vrij is.

Voor de 2S- en SS-beads geldt hetzelfde als voor 4N. De 1Sbeads hebben net als 2N een zeer grote en constante afname.

Straat 1 produceert continu 1S en straat 2, 2S of SS. Als het nodig is, kan op straat 2 ook nog 1S worden geproduceerd. Uitgaande van een produktiedoorlooptijd van drie à vier dagen zijn bestelniveau en seriegrootte voor alle typen uitgerekend en samengevat in tabel 8.

11. Conclusies en aanbevelingen

– De extrusie-afdeling

Het is mogelijk om in de extrusie-afdeling orderproductie toe te passen. Hierbij kan worden gewerkt met een planninginterval van een halve week en een lever-tijd van twee weken voor alle produkten en twee weken voor alle kleur- en SS-produkten. Een capaciteits-buffervoorraad moet zorgen voor een gelijkmatige capaciteitsbezetting.

– De polymerisatie-afdeling

In de polymerisatie-afdeling is overcapaciteit; er mag dus wel eens extra worden omgesteld.

Planning houdt hier in, het verdelen van de reactoren over de produktiestraten, aan de hand van de verwachte behoefte aan Nbeads en S-beads en vervolgens het aangeven welke beadseries op elke produktiestraat moeten worden geprodu-ceerd.

De voorraden beads fungeren dan als KOOP.

Literatuur

1. Botter, C. H. , *Industrie en organisatie*, Kluwer/Nive, 1967.
2. Magee, J. F. en Boodman, D. M. , *Production Planning and Inventory Control*, New York, McGraw-Hill, 1967, blz. 248-253.
3. Weele, A. J. van, *Purchasing control, Performance measure ment and evaluation of the industrial purchasing functi on*, Wolters-Noordhof, 1984.
4. Bertrand, J. W. M. , Geraerds, W. M. J. , Geurts, J. H. J. , Monhe mius, W. , Wijngaard, J. *Syllabi TUE*.

Het afstudeerrapport van A. H. S. M. Linders verscheen reeds eerder, herschreven door M. Igel, in *Doelmatige Bedrijfsvoering*, Jrg. 2, Nr. 1/2, januari/februari 1990

Fustopslag en fustuitgifte

16

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. B.J.A. Beurskens en samengevat en bewerkt door M. Igel

1. Bedrijfsbeschrijving en opdracht

Het VBA-gebouw beslaat 630.000 m² en bestaat gedeeltelijk uit twee etages en enkele tussenvloeren. De omzet in 1988 bedroeg f 1764 miljoen; het aantal werknemers was 1465.

Per veiling zijn er ruim 3200 kopers.

Binnen de VBA zijn twee goederenstromen te onderscheiden, de zojuist beschreven goederenstroom van produkten en de goederenstroom van emballagemiddelen. De goederenstroom van emballagemiddelen bestaat uit verpakkingsmaterialen (*fust*) die op stapelwagens wordt vervoerd. De omzet van emballage is f 532 miljoen. De afdeling 'Stapelwagen-Fustbeheer' (SF) is verantwoordelijk voor de emballage-stromen.

Het *onderzoek* richtte zich op de interne goederenstroom van 'fust'. Stapelwagen- en Fustbeheer vond dat het gehele proces van inname tot uitgifte van fust niet voldoende efficiënt verliep. Het probleem kwam tot uiting in ruimtegebrek ondanks een ruimtebeslag van 20.000 m².

De onderzoeksopdracht luidde mede daarom;

'Ontwerp een centraal opslag- en uitgiftesysteem van fust'.

2. De goederenstroom

Fust kan worden ingedeeld in eenmalig- of meermalig fust, snijbloemen- of potplantenfust en ingespoeld- of ongespoeld fust.

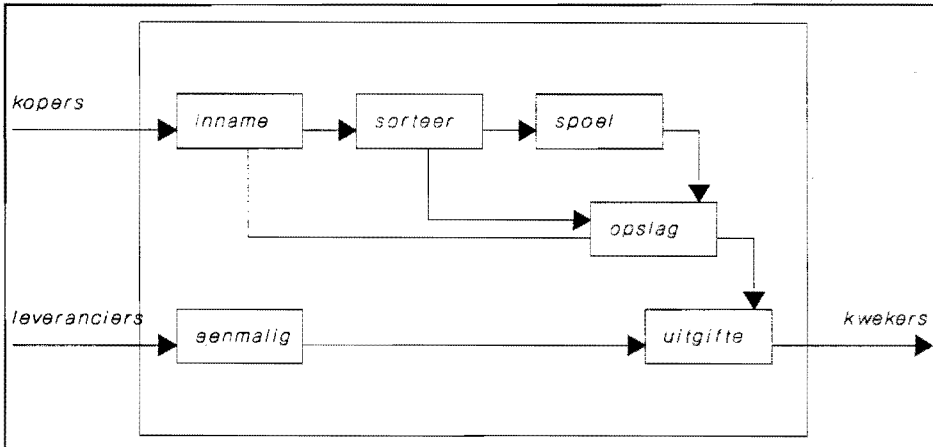
De afdeling SF voert in de interne goederenstroom van fust vier hoofdactiviteiten uit:

– *Inname*: meermalig fust rouleert volgens een statiegeldsysteem.

De kopers leveren fust in bij een vijftal innamepunten; het fust wordt daar

gesorteerd en afgevoerd. Bij grote kopers met een eigen verwerkingsruimte wordt fust ongesorteerd opgehaald door de ophaaldienst.

- *Sorteren*: het gedeelte van het fust dat nog niet gesorteerd is, wordt gesorteerd en verder getransporteerd naar de spoelafdeling of naar de verschillende opslagfuncties.
- *Spoelen*: er zijn drie spoelmachines, die in één of twee ploegen draaien.
- *Opslag*: de opslagfunctie is over vele lokaties verspreid. In de wijze van opslag wordt het volgende onderscheid gemaakt:
 - werkvoorraad voor het klaarmaken van uitgifte
 - lange termijn opslag: meermalige fust, dat niet direct beschikbaar hoeft te zijn
 - opslag-eenmalig: ingekochte eenmalige codes waarvan de voorraad dagelijks wordt aangesproken om de werkvoorraden aan te vullen
 - opslag-overslagcentrum (OOC): stapelwagens met bloemen en planten die kopers tijdelijk willen opslaan.
- *Uitgifte*: er zijn twee uitgifte-functies, winkel en bestellingen. In de winkel kunnen kwekers zelf fust afhalen. Bij bestellingen worden de binnengekomen bestellingen klaargemaakt en bij het OOC klaargezet. Het gaat hier om zowel leeg fust als om produkt.



Figuur 1. Interne goederenstroom van fust

De wijze waarop de fustsoorten door de verschillende onderafdelingen van S&F stromen, wordt weergegeven in figuur 1.

Tijdens het vooronderzoek kwamen onder meer als knelpunten in de bestaande interne fuststroom naar voren:

- verspreiding van functies door het veilinggebouw bemoeilijkt de coördinatie en veroorzaakt transport over grote afstanden (800 m.)
- versnippering van opslag en handling in de vele lokaties veroorzaakt inefficiëntie

- de opslagruimtes moeten ook voor anderen (bijvoorbeeld verhuur) beschikbaar blijven en zijn dus niet speciaal voor opslag ingericht
- piekbelasting bij *inname* en *sorteren*, omdat de kopers tegelijk het fust inleveren, vlak voor het veilen.

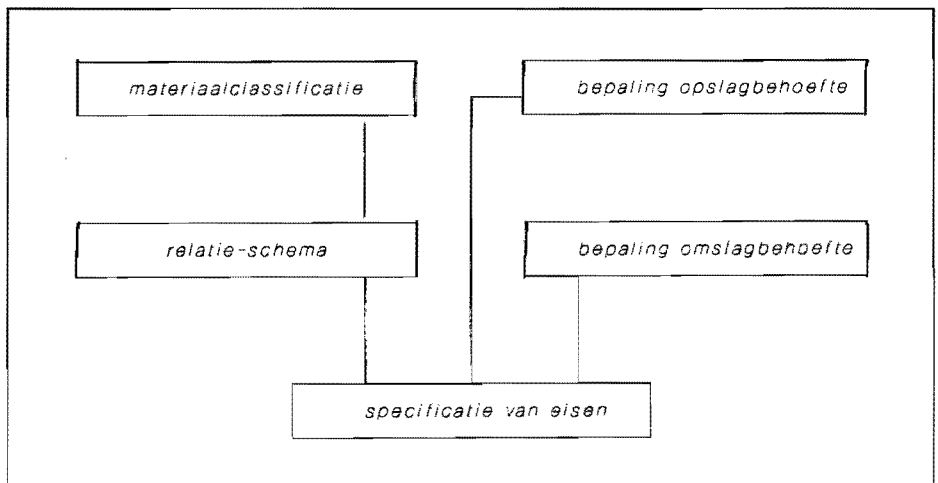
Inname en Sorteren werden verder niet bij het onderzoek betrokken. Voorgesteld werd om slechts de sorteerfunctie onder te brengen bij Inname. Door het samenvoegen van de functies kan tijdelijke leegloop van inname-personeel worden opgevangen met sorteerwerkzaamheden. Uitgangspunt voor het verdere onderzoek was derhalve om Inname verantwoordelijk te stellen voor het afleveren van gesorteerde volle stapelwagens aan de opslagfuncties.

3. Analyse van de interne fuststroom

Voor het uitvoeren van de opdracht werd in de analysefase gewerkt volgens de methode van R. Muther, Systematic Handling Analysis¹², aangevuld met een analyse van de opslag- en omslagbehoefte.

In de daaropvolgende selectiefase zijn op basis van kapitaalwaarde en kwalitatieve criteria verschillende magazijnsystemen met elkaar vergeleken. Vervolgens werd het geselecteerde systeem vervat in een investeringsvoorstel.

De stappen, waarin de analyse werd doorgelopen is in figuur 2 aangegeven. Bovendien werden de resultaten getoetst aan een toekomstverwachting.



Figuur 2. Stappenlijn van de analysefase

- *Materiaalclassificatie en relatieschema*

De verpakkingsmaterialen ondergaan niet allen dezelfde bewerkingen. Onder-

scheid wordt gemaakt tussen eenmalig versus meermalig en gespoeld versus niet gespoeld fust.

Wat de vorm betreft van de goederen die moeten worden opgeslagen, werd uitgegaan van de opslag in stapelwagens en op pallets.

In onderstaande tabel staat de indeling van materialen in de uiteindelijke klassen.

Tabel 1. Materiaalclassificatie

<i>klasse</i>	<i>soort</i>	<i>vorm</i>	<i>spoelen</i>	<i>% codenr's</i>	<i>% omzet</i>
I	meermalig	stapelwagen	niet	1	37
II	meermalig	stapelwagen	wel)		
III	meermalig	stapelwagen	niet)	10	35
IV	meermalig	stapelwagen	wel)		
V	meermalig	stapelwagen	niet)	21	18
VI	eenmalig	pallets	niet)		
VII	eenmalig	stapelwagen	niet)		
VIII	eenmalig	pallets	niet)		
IX	eenmalig	stapelwagen	niet)	68	10

De verdere beschrijving van de materiaalstroom zal gebeuren aan de hand van deze materiaalklassen.

Om een beeld te krijgen van de stromen van de verschillende materiaalklassen tussen de bewerkingsfuncties en de intensiteit daarvan, werd een relatieschema opgesteld.

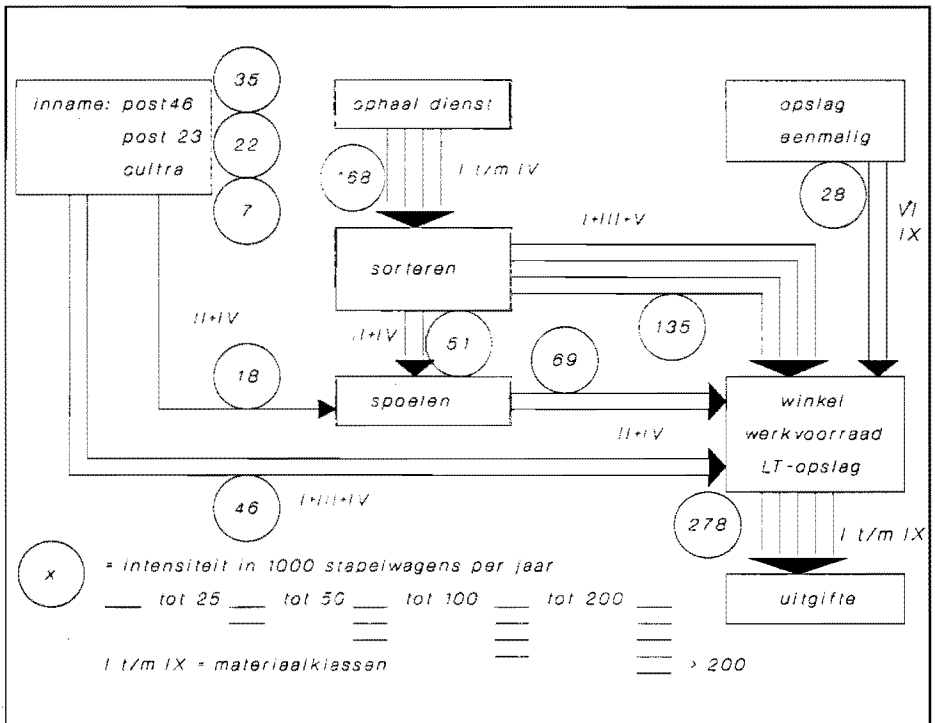
Dit schema is van belang voor het bepalen van een optimale lay-out. De intensiteiten zijn bepaald aan de hand van de jaarcijfers. Figuur 3 geeft dit schema weer; de 'dikte' van de pijlen geeft een indruk van de intensiteit.

Bij het verdere onderzoek werden de inname- en sorteerfunctie niet meer meegenomen.

– Opslag- en omslagbehoefte

Aan het te ontwerpen centrale opslagsysteem werden de volgende functies toegekend:

- lange-termijn voorraad van meermalige codes (LT)
- werkvoorraad voor uitgifte van volle stapelwagens (WVV)
- werkvoorraad voor de uitgifte van deelhoeveelheden (WVD)
- opslag eenmalige codes voor aanvulling van WVV en WVD(EENM)
- opslag van stapelwagens produkt ten behoeve van kopers(OOC)
- algemene bufferruimte voor ingenomen stapelwagens (BUF)
- spoelafdeling (SPO)
- in en uitgaande stroom, vanaf de spoelafdeling en vanaf de innamepunten (IN/UIT).



Figuur 3. Goederenstroom van emballage

De opslagfuncties LT, WVV, WVD, EENM en OOC werden onderscheiden omdat zij verschillen in opslagbehoefte, omslagbehoefte en soort output (volle of gedeeltelijk gevulde, deel-stapelwagens)

Onderstaande tabel geeft een overzicht van die verschillen zoals die uit de analyse bleken.

Tabel 2. Opslag- en omslagkarakteristieken

	opslagbehoefte	omslagbehoefte	aantal coden's	soort output
LT	groot	klein	22	vol
EENM	middel	klein	81	vol
WVV	middel	groot	50	vol
WVD	zeer laag	zeer laag	103	deel
OOC	laag	middel	uniek codenummers	vol

LT en EENM zijn beide te beschouwen als bulkvoorraden, van waar uit WVV wordt aangevuld.

Uitgaande van de genoemde functies ontstond een *movement summary* voor de centrale fustloods zoals onderstaande tabel 3 dat laat zien.

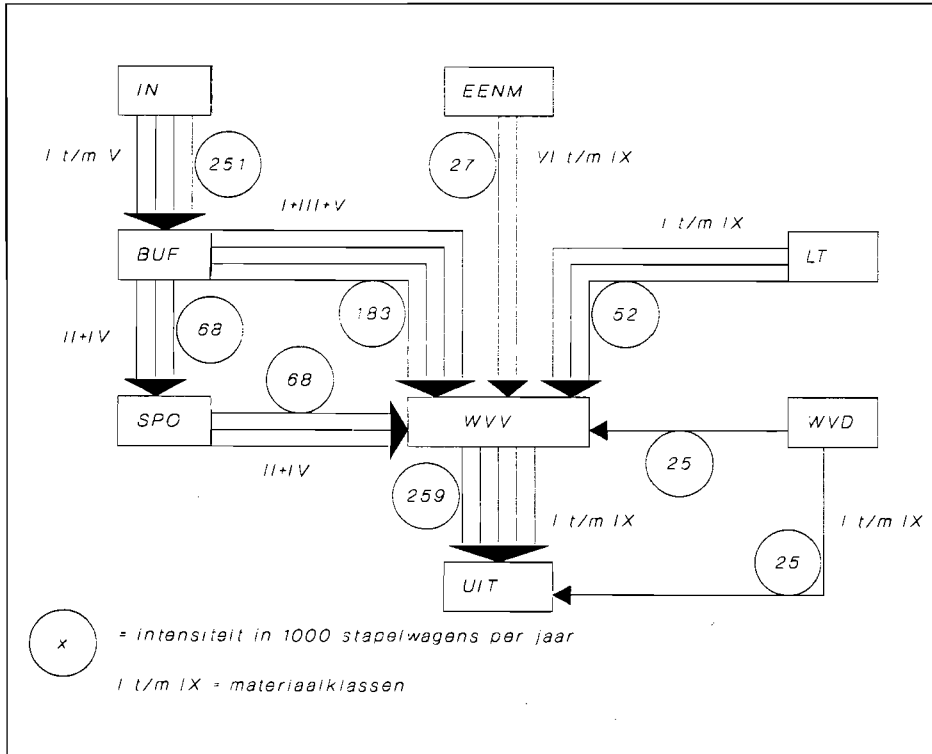
Tabel 3. Movement summary voor een centrale fustloods

RELATIE	MATERIAALKEUZE					TOTAAL	
	I	II	III	IV	V	VI-X	
IN-BUF	117	58	57	10	9		251
BUF-SPO		58		10			68
BUF-WVV		117	57		9		183
SPO-WVV		58		10			68
WVV-WVD	6	3	3	1	1	5	19
EENM-WVV						27	27
LT-WVV	24	12	12	2	2		52
WVV-UIT	111	58	54	9	8	22	259
WVD-UIT	6	3	3	1	1	5	19

Per materiaalklasse, per relatie zijn de intensiteiten daarvan weergegeven in duizenden stapelwagens per jaar. Per relatie is op dezelfde wijze een totale intensiteit aangegeven.

(Van het OOC ontbraken tijdens dit onderzoek de gegevens.)

Dit Movement Summary, aangevuld met de opslagbehoefte en omslagbehoefte, dient als uitgangspunt voor het kiezen van de layout en material-handling methode. Het movement-summary is als *relatiediagram* weergegeven in figuur 4.



Figuur 4. Goederenstroom in de centrale opslag (als relatiediagram)

– *Opslagbehoefte*

WVV en WVD:

Aangezien de werkvoorraden zijn bestemd om elke dag te voldoen aan de uitgiftebehoefte is de hoogste daguitgifte bepalend voor de vereiste opslagcapaciteit, te weten 1752 stapelwagenplaatsen WVV en 141 stapelwagen-palletplaatsen WVD. Hiervan betreft in totaal 1600 de opslagbehoefte van meermalige codes, terwijl bovendien bleek dat 5% van de meermalige codes en 20% van de eenmalige codes werd opgesplitst in deelwagens.

LT:

Uit onderzoek bleek dat de opslagbehoefte varieerde van 7000 à 9000 stapelwagens in de winter tot 3000 à 6000 in de zomer.

EENM:

De opslagbehoefte wordt bepaald door het gehanteerde inkoopstelsel. Het nu gehanteerde stelsel heeft een gemiddelde voorraad van 1805 pallets. Het inkoopstelsel is niet verder onderzocht; de opslagbehoefte is gesteld op 2000 plaatsen.

OOC:

Uit onderzoek bleek dat de hoogste voorraad stapelwagens produkt 400 was.

– *Omslagbehoefte van de opslagfuncties*

WVV en WVD:

De uitgifte van fust had voornamelijk plaats aan het begin en het einde van ieder etmaal. De hoogst gemeten uitgifte snelheid bedroeg dan respectievelijk 350 stapelwagens en 28 stapelwagens per uur. In de tussengelegen tijd zou de capaciteit dus kunnen worden aangewend voor inname, sorteren en spoelen.

LT:

De omslagcapaciteit moet zodanig zijn dat het grootste verschil tussen weekuitgifte en weekinname binnen één week kan worden gecorrigeerd. Het hoogste verschil bedroeg 1250 stapelwagens. Een omslagsnelheid van 35 stapelwagens per uur is dus voldoende.

EENM en OOC:

De volledige daguitgifte, respectievelijk 317 en 350 stapelwagens, moet in een dag worden omgeslagen; een omslagsnelheid dus van 40 en 45 stapelwagens per uur.

4. Specificatie van eisen

Bij de bepaling van de specificatie van eisen gebaseerd op het voorgaande is in eerste aanleg uitgegaan van de gegevens van 1988. Het opslag- en uitgiftesysteem zal echter tenminste tien jaar dienst moeten doen.

Er zijn tal van factoren gedurende die periode die van invloed zullen zijn op met name de opslagbehoefte, zoals bijvoorbeeld:

- omzetgroei
- andere wijze van verpakken en transport
- directe leveringen en marktaandeel van het bedrijf in verpakkingen
- rationalisatie assortiment
- centrale depôts en directe leveringen
- milieu.

In tabel 4 staan de groeicijfers per produktgroep weergegeven als een indexcijfer.

Tabel 4. Omzetgroei

<i>jaar</i>	<i>snijbloemen index</i>	<i>potplanten index</i>
1972	100	100
1975	153	184
1981	213	475
1984	249	671
1987	300	1006
1988	321	1071

De vraag is nu in wat voor verpakkingen de omzetgroei moet worden vertaald. Zo zal bijvoorbeeld een snijbloemencontainer geïntroduceerd worden, die een verbetering in beladingsgraad van de stapelwagens zal geven van 30%. Ook zal het transport van snijbloemen op water steeds belangrijker worden. De omzet van snijbloemen in eenmalige verpakkingen zal daarom afnemen.

Er zal een groei plaatshebben van het direkt leveren van verpakkingen door de fabrikant aan grote kwekers en een dalend marktaandeel in de eigen bedrijfsverpakkingen. Toch zal er niet worden uitgegaan van een dalend aantal codes, omdat een drang naar diversificatie ontstaat, omdat de kwekers hun produkt willen onderscheiden.

Het gegeven tenslotte dat de grote hoeveelheden eenmalige verpakking milieu-problemen veroorzaken, zal het gebruik ervan nadelig beïnvloeden.

De geschetste ontwikkeling, getoetst aan de omzetcijfers van produkten geven de verwachte groeicijfers per groep verpakkingen;

- eenmalige snijbloemverpakkingen geen groei
- meermalige snijbloemverpakkingen, 7% groei per jaar gedurende tien jaar
- eenmalige kartonnen potplantenverpakkingen 6% per jaar gedurende drie jaar
- eenmalige tempex potplantenverpakkingen 3% per jaar over twee à drie jaar
- meermalige potplantenverpakkingen 7% groei per jaar over tien jaar.

De behoefte aan omslagcapaciteit van WVV zou eveneens met 80% groeien. Omdat echter niet behoefte te worden uitgegaan van de piekbelasting kan worden

volstaan met een omslagcapaciteit van 500 stapelwagens per uur. Voor LT en EENM zal worden uitgegaan van een verdubbeling van de omslagcapaciteit.

Een analyse resulteerde in een specificatie van eisen voor het jaar 2000 (zoals in tabel 5 weergegeven). De getallen geven de aantallen stapelwagens of pallets weer.

Tabel 5. Specificatie van eisen voor 2000

functie	opslagcapaciteit		omslagcapaciteit/uur		aantal codes	output vorm
	1988	2000	1988	2000		
WVV	1752	3000	350	500	50	vol
WVD	141	300	28	—	103	deel
LT	7400	12000	35	75	22	vol
EENM	2000	3000	40	75	81	vol
OOC	400	1000	45	100	400	vol

5. Selectie uit alternatieve oplossingen

De voorselectie uit de mogelijkheden op de markt voor opslagsystemen werd uitgevoerd met het vereiste vloeroppervlak als criterium. Negen bruikbare alternatieven werden daarna zover uitgewerkt dat een selectie gemaakt kon worden gemaakt op basis van:

- systeemkosten
- investeringsbedrag
- arbeidskosten en
- kwalitatieve factoren.

De hierna overgebleven twee mogelijkheden werden vervolgens geheel uitgewerkt om wederom aan elkaar te worden getoetst.

Onder *systeemkosten* wordt verstaan de jaarlijkse kosten van het opslagsysteem zoals afschrijving en rentekosten van stellingen, apparatuur en gebouwen, deriving van huuropbrengst van vierkante meters, onderhouds-, energie- en softwarekosten.

Bij de *investeringswaarde* werd ook de liquidatiewaarde betrokken.

Verder werden afgewogen, de *directe arbeid* van de vereiste handmatige omslag en de apparatuurbediening.

De *kwalitatieve factoren* zijn de kenmerken, die niet in geld zijn uit te drukken zoals onder meer:

- aanpassingsmogelijkheden van de ruimte en bruikbaarheid voor andere doeleinden
- mogelijkheden tot capaciteitsuitbreiding
- beheerstheid van het proces en wachttijden van de klanten

- veiligheid en de kwaliteit van de arbeid
- het opdoen van ervaring met geavanceerde opslagsystemen en de imago-verhoging van ‘Stapelwagen & Fustbeheer’.

Uit de genoemde financiële gegevens is de kapitaalwaarde over tien jaar berekend. De beoordeling van elk van de kwalitatieve factoren is gewaardeerd aan de hand van een wegindex, verkregen middels een enquête.

De negen alternatieven zijn de volgende:

Alternatief 1:

de huidige situatie handhaven, de LT-voorraad echter wordt in boxpallets opgeslagen en niet, zoals nu, op stapelwagens; hoogte tot 10 meter.

Alternatief 2:

WVV wordt onder de inschuifstellingen van LT geplaatst, vier lagen hoog en tien plaatsen diep.

Alternatief 3:

zowel LT als WVV worden in inrijstellingen geplaatst, vier lagen hoog en tien diep. WVV op de begane grond.

Alternatief 4:

WVV en LT staan in inschuifstellingen. EENM en OOC staan in conventionele stellingen, vier lagen hoog en twee plaatsen diep. WVD staat niet in stellingen.

Alternatief 5:

het dynastore systeem, vier lagen hoog. Horizontaal en vertikaal transport zijn gescheiden en ondanks het gebruik van inschuifkanalen is elke palletplaats apart identificeerbaar. Alles wordt hierin opgeslagen.

Alternatief 6:

vergelijkbaar met alternatief 2 echter acht lagen hoog. EENM wordt eveneens in de inschuifstelling opgeslagen.

Alternatief 7:

vergelijkbaar met alternatief 6 echter, de inschuifstellingen worden bediend met bemande kranen. WVV wordt eveneens in inschuifstellingen geplaatst.

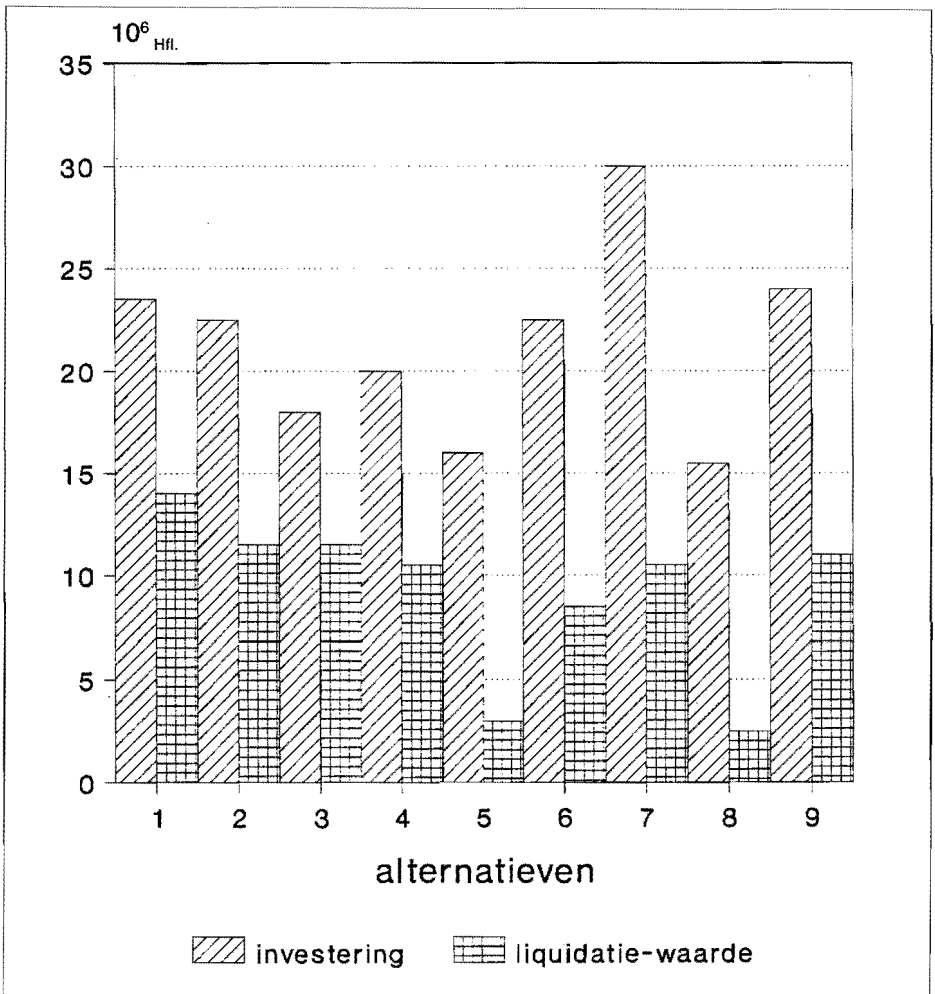
Alternatief 8:

identiek aan alternatief 5, alleen acht lagen hoog.

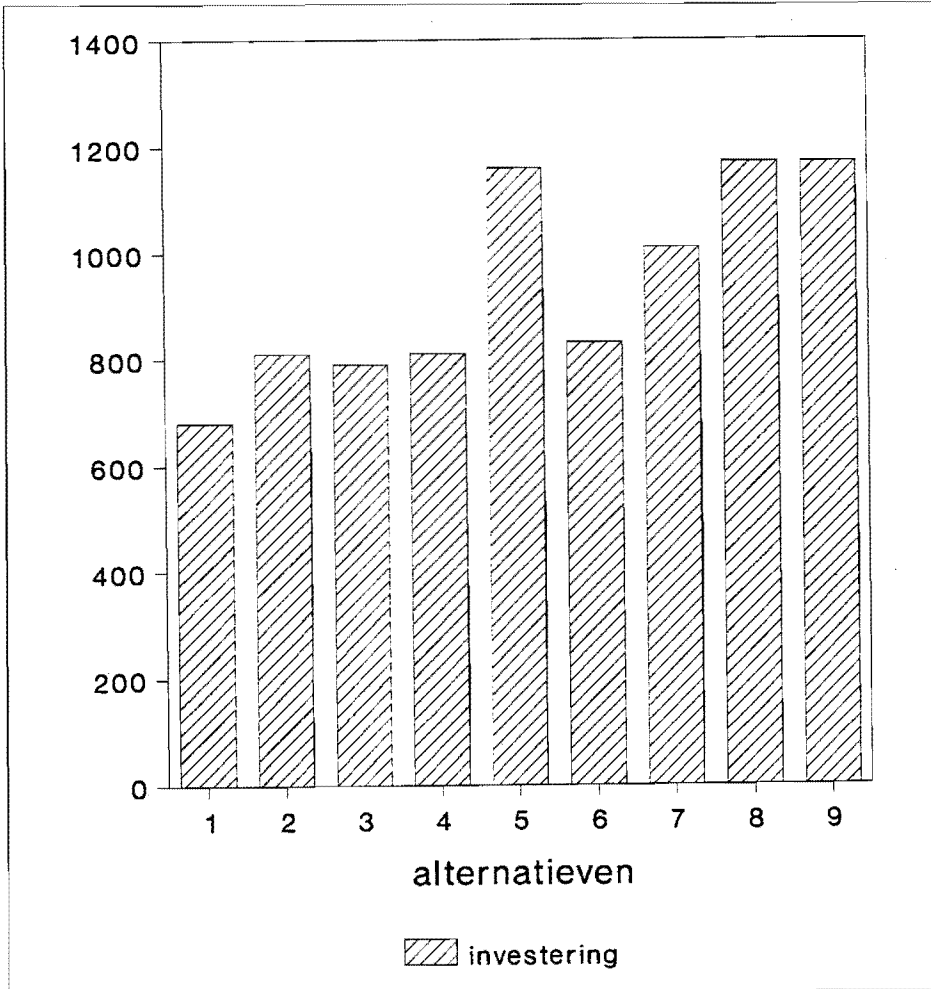
Alternatief 9:

alles in conventionele stellingen, waar de stapelwagens twee diep worden weggezet door volautomatische kranen.

Figuur 5 geeft een vergelijking van de alternatieven op grond van investering en liquidatiewaarde na tien jaar.



Figuur 5. Investerings- en liquidatiewaarde na tien jaar



Figuur 6. Beoordeling van de kwalitatieve factor

In figuur 6 staan de resultaten van de gewogen methode van de kwalitatieve factoren. Op basis van de kapitaalwaarde komen de alternatieven 3, 5, 6, 8 en 9 als beste naar voren. De score op de kwalitatieve factoren is het best voor de alternatieven 5, 8 en 9.

In aanmerking nemend dat de alternatieven 2 en 6 technisch moeilijk realiseerbaar waren, werd op basis van het bovenstaande besloten de alternatieven 8 en 9 verder uit te werken tot een voorstel.

6. Uitwerken van de gekozen alternatieven

Het betreft hier het *kranenmagazijn* en *dynastore*.

Voor beide systemen gold dat WVV en OOC bepalend waren voor de omslagbehoefte van 600 stapelwagens per uur en een opslagbehoefte van 4000 stapelwagens (zie tabel 5).

- Het kranenmagazijn

De stellingen zijn twee stapelwagenplaatsen diep, waarbij de vaste kranen voorzien zijn van telescoopvorken om de tweede plaats te kunnen bereiken. Het aantal kranen is bepalend voor de lay-out.

De gemiddelde cyclustijd om een stapelwagen in het magazijn te zetten of uit het magazijn te halen, bepaalt het benodigde aantal kranen. De plaats in de stelling, waarvoor de heftijd gelijk is aan de rijtijd, is de ideale lokatie voor WVV en OOC.

De tabel 6 geeft een overzicht van de rij- en heftijden (resp. R en H) in relatie tot het aantal kranen(K) en het aantal etages(E), waarin WVV en OOC zijn opgeslagen.

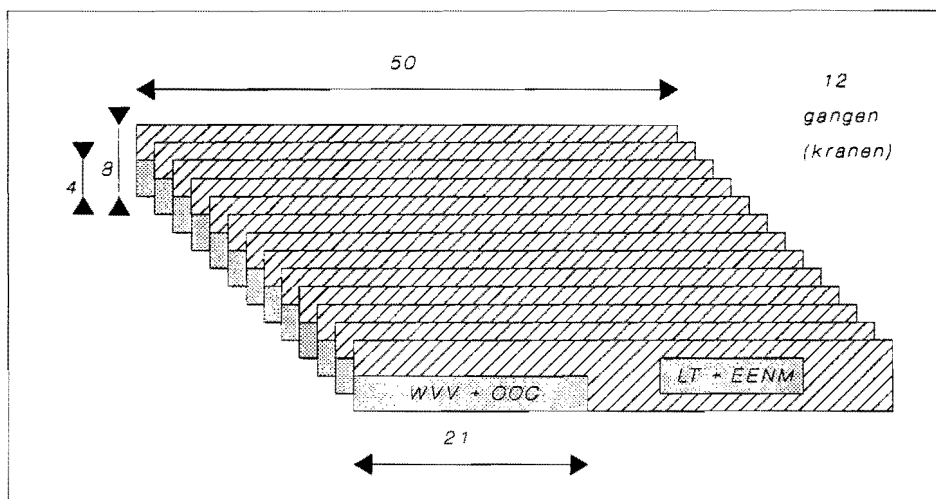
Tabel 6. Gemiddelde rij- en heftijden in een kranenmagazijn

K	E = 1		E = 2		E = 3		E = 4	
	R	H	R	H	R	H	R	H
11	34	6	27	13	17	19	14	25
12	31	6	21	13	16	19	13	25
13	29	6	19	13	14	19	12	25
14	27	6	18	13	13	19	11	25
15	25	6	17	13	13	19	10	25

De *cursieve* cijfers betreffen de situatie's waarin de totale omslagcapaciteit groter is dan de vereiste 600 stapelwagens per uur. De laagste investering waarbij dit het geval is, is twaalf kranen.

Bijvoorbeeld, in geval $K = 12$ en $E = 3$ is (bij een opzet- en afzettijd van 49 seconden) de capaciteit $12 \cdot 60^2 / (49 + 19) = 635$ stapelwagens per uur. Deze oplossing is ook het gunstigste, omdat hier gemiddelde heftijd en gemiddelde rijtijd zo min mogelijk verschillen.

Op basis van bovenstaande berekening ontstond tenslotte de in figuur 7 beschreven magazijnlayout. De getallen in de figuur stellen het aantal stapelwagenplaatsen voor. Het magazijn is acht plaatsen hoog (zie punt 5, alternatief 9).



Figuur 7. Indeling van het kranenmagazijn

– *Dynastore*

Het kenmerk van het dynastoresysteem is de ontkoppeling van het verticale en horizontale transport. Trolleys transporteren op de etage en leveren stapelwagens af bij de lift, terwijl de lift ondertussen stapelwagens tussen de etages transporteert. Alleen het aantal liften is bepalend voor de layout. Grotere kanalen dan twee diep voor willekeurige opslag zijn mogelijk.

Voor dynastore moest een gelijksoortige capaciteitsberekening worden uitgevoerd als voor het kranenmagazijn. De berekening van de benodigde trolleys en liften kan echter afzonderlijk gebeuren.

De totale cyclustijd (C) van een stapelwagen is de opzettijd en afzettijd (van 14 seconden) plus de gemiddelde heftijd (H). (L) is het aantal liften. E is weer het aantal etage's WVV en OOC .

Tabel 7 laat zien hoeveel liften (K) er nodig zijn om de vereiste omslagcapaciteit van 600 stapelwagens per uur te halen ($L = 600 * C / 60^2$). Er zijn dus minimaal vier liften nodig.

Tabel 7. Benodigde aantal liften bij Dynastore

E	H	C	L
1	4	18	3.0
2	6	20	3.3
3	8	22	3.73
4	10	24	4.0
5	12	26	4.3

Tabel 8 laat zien in welke mate de omslagcapaciteit per trolley (uitgedrukt in sta-

pelwagens) afhankelijk is van de gemiddelde rijafstand (A), terwijl de rijafstand weer afhankelijk is van het aantal etages. L is het benodigde aantal trolley's.

Tabel 8. Opslagcapaciteit per trolley

E	A	omslagcapaciteit	T
1	60	56 / uur	10,8
2	40	62 / uur	9,7
3	30	65 / uur	9,3
4	24	66 / uur	9,1

Uitgaande van een vereiste omslagcapaciteit van 600 stapelwagens per uur zijn er dus tenminste tien trolley's nodig. Per trolleygang zijn twee liften nodig om een eventuele storing op te vangen. Omdat vier liften voldoende capaciteit leveren (zie tabel 7) moeten er dus vijf etages komen met elk twee trolleygangen. Uit de tabel blijkt echter dat bij $E = 5$, vier liften eigenlijk net niet voldoende zijn. Het tekort werd echter voorlopig aanvaardbaar geacht.

In figuur 8 staat tenslotte het bovenaanzicht van het magazijn de hoogte is wederom acht etages (zie punt 5, alternatief 8). De getallen, die stapelwagenplaatsen voorstellen, zijn op dezelfde wijze verkregen als bij het kranenmagazijn.

– Magazijnindeling

Voor beide systemen is bepaald hoe WVV en OOC in het magazijn moeten worden geplaatst. Om de capaciteit van de I/O-apparatuur zo goed mogelijk te benutten, moeten bovendien binnen WVV de snellopende artikelen sneller bereikbaar zijn dan de langzaamlopende.

Daarom worden drie magazijnklassen vastgesteld:

– Klasse a:

codes, die een regelmatige hoge omzet hebben. Het betreft bijna alle meermalige codes en enkele eenmalige codes

– Klasse b:

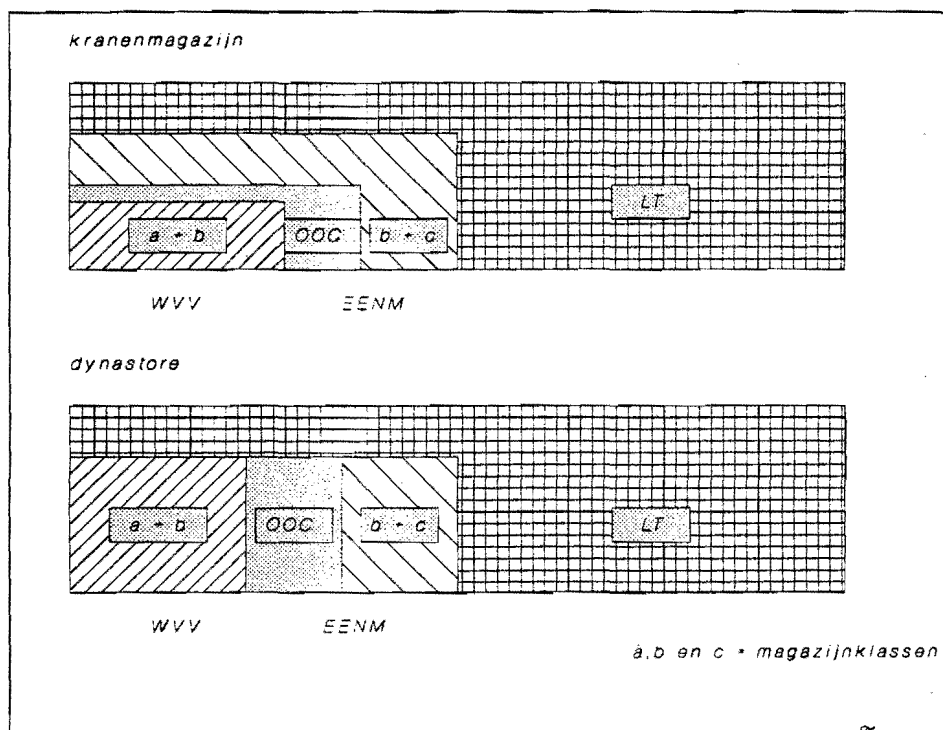
codes die alleen seizoenmatig hoge, maar wel voorspelbare omzet hebben

– Klasse c:

codes, die een lage omzet hebben of geen voorspelbaar seizoen vertonen.

Voor dynastore is het zo dat, door de ont koppeling van horizontaal en vertikaal transport, de snellopers dicht bij de lif ten moeten worden geplaatst. Dit resulteert in een artikelindeling zoals in figuur 9 wordt aangegeven. OOC heeft daarin een hogere prioriteit dan de b-artikelen, omdat de omzet per uur hoger is.

In beide oplossingen komt de totale opslagcapaciteit overeen met de eisen, genoemd in tabel 5.



Figuur 8. Bovenaanzicht Dynastore

Omdat op de drukste dag een kwart van de weekhoeveelheid wordt uitgegeven, wordt per code een kwart van de weekhoeveelheid in WVV opgenomen.

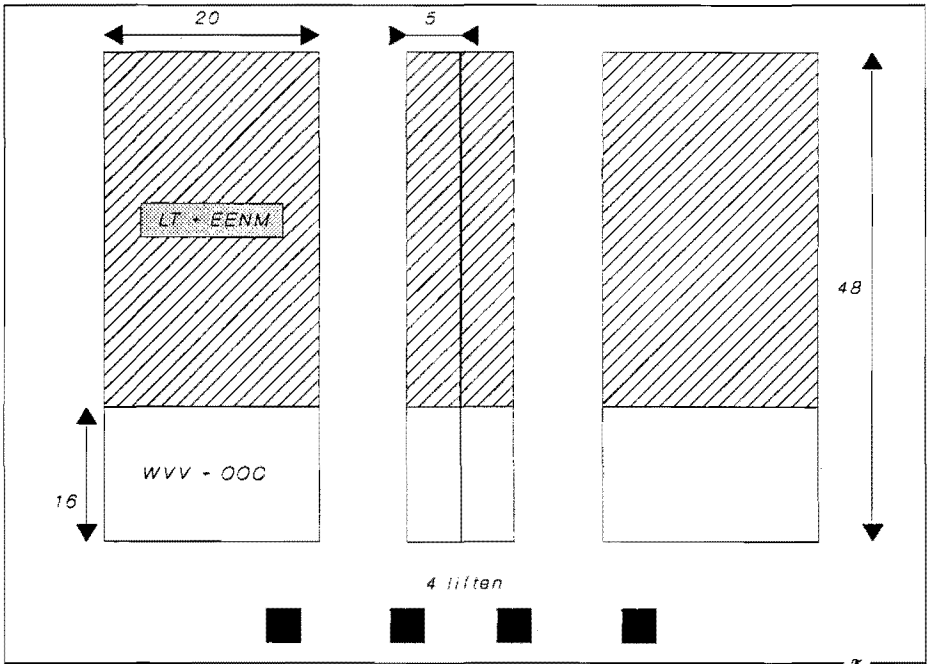
Regelmatig zullen de seizoenartikelen, met name de b-artikelen anders moeten worden ingedeeld. Op zo'n moment staan een aantal stapelwagens op de verkeerde plaats. Het omzetten heeft op vrijdagmorgen plaats, omdat dan de WVV bijna leeg is. Vanwege de geringe omslag van EENM, werd daar gekozen voor een vaste indeling.

Behalve WVV, EENM, LT en OOC moesten ook de functies BUF, SPO en WVD nog in de layout worden opgenomen.

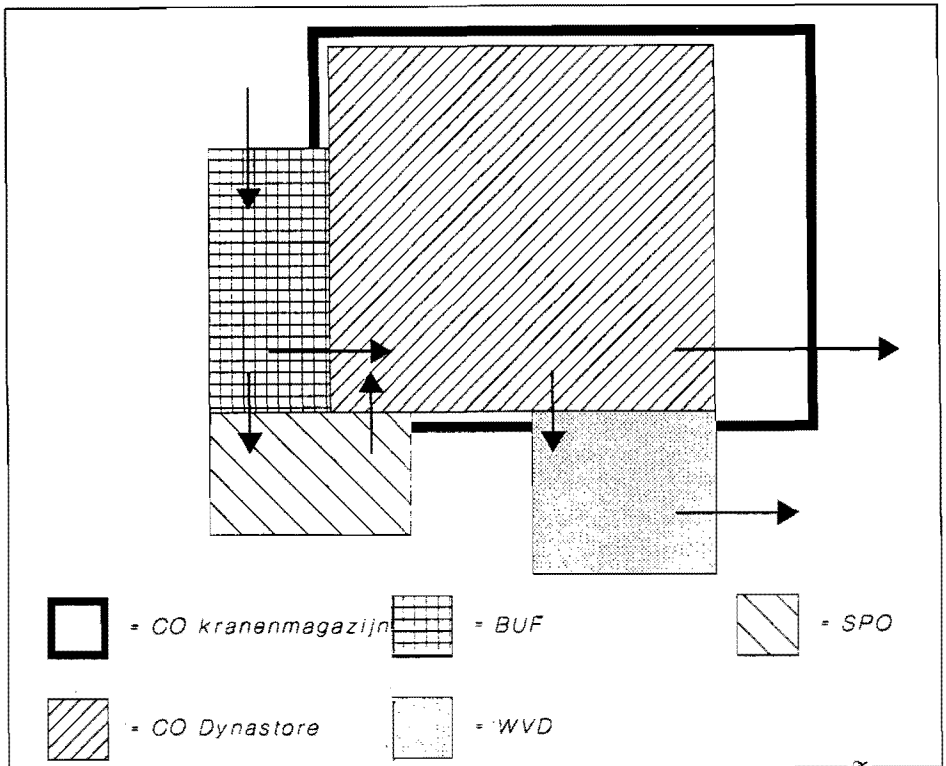
Als uitgangspunt voor de layout gold het movement summary van tabel 3. De benodigde ruimte per functie is in figuur 10 aangegeven. Hierbij zijn WVV, EENM, LT en OOC samengevoegd tot één functie CO (centrale opslag).

Op basis van de layoutafstanden en de transportintensiteit werd tenslotte globaal bepaald welke Material-Handling methoden zouden moeten worden toegepast:

- Route IN/SORT-BUF komt niet in aanmerking voor mechanisatie, omdat de ruimte wordt gebruikt door kopers.
- Route's BUF-SPO en BUF-CO, mechanisatie zal niet nodig zijn omdat de trekkerchauffeurs hier binnen komen en meestal de laatste paar meters kunnen doorrijden.



Figuur 9. Magazijnindeling



Figuur 10. Layout kranenmagazijn en Dynastore

- Route SPO-CO is geschikt voor mechanisatie middels een kettingbaan, omdat de intensiteit hoog is.
- Route's CO-WVD en WVD-UIT zijn ongeschikt voor mechanisatie omdat het kleine hoeveelheden betreft.
- Route CD-UIT is vanwege de hoge intensiteit geschikt voor mechanisatie door verlenging van de output-apparatuur van het opslagsysteem.

7. Investeringsvoorstel en aanvullende overwegingen

De kapitaalwaardenberekening van investerings- en operationele posten over tien jaar geeft de volgende uitkomst:

- kranenmagazijn : f 19. 9 miljoen
- dynastore-systeem : f 16. 6 miljoen

De conclusie luidt derhalve:

- het dynastore-systeem komt het meest in aanmerking.

Buiten de financiële afweging zijn er echter nog enkele andere factoren, die de keuze ten gunste van dynastore bepalen:

- het systeem is eenvoudiger in de bestaande faciliteiten in te bouwen. Bovendien vergt het 75% van de ruimte van het kranenmagazijn en 40% ten opzichte van de huidige situatie
- met een relatief kleine investering kan de output van het magazijn direkt worden aangesloten op de laad- en losplaatsen van vrachtauto's
- SPO, BUF en WVD kunnen onder de stellingen geplaatst worden hetgeen nog eens 1500 à 2000 m² bespaart
- vergeleken met de huidige werkwijze zal op het aantal uitvoerenden in de opslag- en uitgiftefuncties een vermindering van ca. 45% mogelijk zijn
- in de huidige situatie is planning en overzicht onmogelijk vanwege een gebrek aan registratie. Bij dynastore daarentegen worden alle mutaties geregistreerd.

Als gevolg van de hierboven genoemde verlaging van personeelsuitgaven en voorraadkosten, en verhoging van de huurinkomsten zal de investering in zes jaar zijn terug verdiend.

In hoofdstuk 2 werden een aantal knelpunten gesignaleerd, die nog enige aandacht verdienen:

- *Verspreiding en versnippering:*
bij dynastore wordt het fust direkt naar de fustloods gebracht, zodat een goede beheersing mogelijk is; alle activiteiten zijn geconcentreerd op één plaats.

- *Multiderdi-functionele ruimten:*
de dynastore ruimte is speciaal ingericht voor opslag; het verschil in opslagmethode tussen WVV en LT is verdwenen. De specificiteit vermindert echter de mogelijkheid tot uitbreiding.
- *Grote afstanden:*
bij het dynastoresysteem is de enige lange afstand die tussen inname en centrale opslag.
- *Handling:*
in het nieuwe systeem vervalt veel handmatig koppelen, ontkoppelen en formeren van stapelwagens. Werkomstandigheden en imago van SF zullen sterk verbeteren.

Een aantal punten verdient echter nog nadere aandacht:

- het samenvoegen van de inname- en sorteerfunctie.
- het verbeteren van het bevoorradingssysteem van eenmalige verpakkingen.
- het voorraadbeheersingssysteem ter optimalisering van de I/O-apparatuur en de daaraan verbonden periodieke vaststelling van de magazijnklassen.
- omdat de opslag- en uitgiftefuncties dicht bij elkaar komen te liggen, zal het wellicht niet meer nodig zijn dat kwekers fust vooraf bestellen.
- het bedrijf heeft geen ervaring met gemechaniseerde opslagsystemen. De storingskans zal dus aanvankelijk groot zijn. Het dynastoresysteem vereist bovendien procedures die strikter zijn dan men gewend is.
- alvorens tot realisatie over te gaan, zullen zowel de groeicijfers als de kostenontwikkelingen moeten worden getoetst.

Literatuur

1. Muther R. en Haganäs K. , *Systematic Handling Analysis*, Management and Industrial Research Publications, 1969, Kansas City
2. Muther R. , *Systematic Layout Planning*, Nederlandse bewerking: EVO, Algemene Verladere- en Eigen Vervoer Organisatie, 1979, Den Haag
3. Beurskens B. J. A., *VBA-investeringsvoorstel fustopslag en -uitgifte*, afstudeerverslag, 1990, Technische Universiteit Eindhoven

Het afstudeerrapport van B. J. A. Beurskens verscheen reeds eerder, herschreven door M. Igel, in Doelmatige Bedrijfsvoering, Jrg. 2, Nr. 9, september 1990

Sneller leveren door een verbeterde structuur

17

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. P.E. Knijff en samengevat en bewerkt door M. Igel

1. Het bedrijf

Draad en Kabel BV is opgericht rond 1890 en gevestigd in de EEG. In 1932 begon men met de produktie van dunne koperdraad voor elektrische doeleinden. In 1940 werd gestart met de fabricage van snoeren en kabels.

Op dit moment, honderd jaar na oprichting, heeft het bedrijf rond de 800 werknemers en een jaaromzet van ongeveer 200 miljoen gulden.

De concurrentie op de externe markt zal toenemen, en het bedrijf zal meer concurrerend moeten zijn dan in de huidige situatie. Met name de aspecten levertijd en leverbetrouwbaarheid worden belangrijker.

Het bedrijf bestaat uit twee Business Units (BU's):

- *Winding Wire and Wire Products* (BU-WWP)
- *Cables for Industry and Networks* (BU-CIN)

beide BU's zijn verantwoordelijk voor de verkoop, produktontwikkeling en fabricage.

Winding Wire and Wire Products (BU-WWP) maakt voornamelijk wikkeldraad dat vooral wordt toegepast in dynamo's en elektromotoren. Een andere grote klant is de kabeldivisie.

Cables for Industry and Networks (BU-CIN) richt zich op de fabricage van kabels voor de overdracht van energie en signalen; de omzet bedroeg in 1988 ongeveer 110 miljoen per jaar.

Van deze omzet werd ongeveer 45% gerealiseerd in Nederland en het overige in de rest van West-Europa.

Draad en Kabel BV maakt ongeveer 400 verschillende produkten, variërend van dunne wikkeldraad met een diameter van 0,02 mm tot polsdikke telefoonkabels.

Het onderzoek had plaats in de 'kabel-afdeling' (BU-CIN).

Door de BU-CIN zijn een viertal Produkt-Markt-Combinaties(PMC) gedefinieerd:

- *power*
kabels voor energie-overdracht
- *tv-distributie*
coaxiale kabels voor overdracht van tv-signalen
- *telefonie*
kabels voor overdracht van spraaksignalen
- *datacommunicatie*
kabels voor laag- en hoogfrequent signaaloverdracht in lokale netwerken.

Binnen elke Produkt-Markt-Combinatie (PMC) zijn weer een aantal *produktgroepen* te onderscheiden; binnen de afdeling zijn de productieprocessen van de PMC's niet van elkaar gescheiden.

De produktgroep GPEW (buitenkabels met een waterbelemmerende afdichting) maakt deel uit van de PMC-Telefonie. Het aandeel dat de GPEW kabels hadden in de omzet was 9%. Het betreft dan een lengte van 2200 km kabel, die wordt afgenomen door slechts een klant: de PTT.

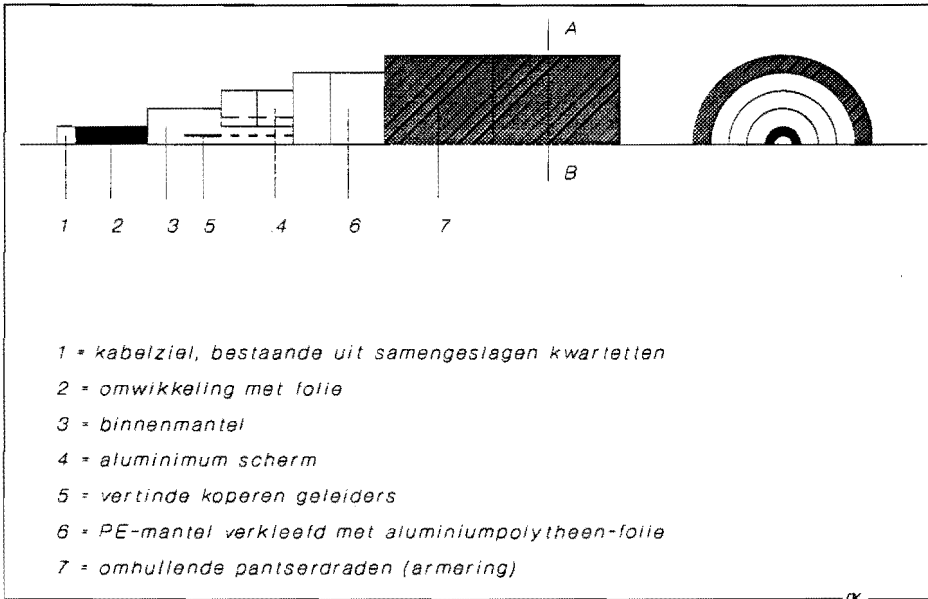
Aanleiding tot het onderzoek was het probleem dat in de produktgroep GPEW de doorlooptijd van het productie-proces niet in overeenstemming was met de gevraagde levertijden. Hieruit kwam de volgende opdrachtformulering voort: 'geef aanbevelingen om te komen tot een beheerste en zo kort mogelijke doorlooptijd'.

2. Het produkt

Van een massieve koperkern met een diameter van 8 mm wordt in de afdeling WWP in een aantal stappen een koperdraad van diverse diameters getrokken. Na een gloeibewerking om de draden soepel te maken wordt een aantal produkten bedekt met een isolerende emaillelaag. Van de omspoten koperdraden worden in de afdeling CIN kabels gemaakt.

Er zijn twee soorten GPEW-kabel; gasdichte (twee uitvoeringen) en niet-gasdichte (zeven uitvoeringen). De gemaillieerde koper draden worden, nadat ze eerst in een kleur zijn omspoten, in groepen van vier draden van verschillende kleur samengeslagen. Deze groepen worden kwartetten genoemd.

De verschillende kabeluitvoeringen ontstaan doordat het aantal kwartetten waaruit een kabel is opgebouwd varieert van één tot vijftig. In figuur 1 is de opbouw van een GPEW-kabel weergegeven.



Figuur 1. Opbouw van een GPEW-kabel

De gasdichte kabel is identiek aan de niet-gasdichte tot er Polytheen omheen wordt gespoten. Vervolgens wordt de kabel gearmeerd met vertind staal, en wordt er nogmaals een mantel omgespoten.

3. Het productieproces

In het productieproces werden vijf bewerkingsgroepen onderscheiden:

– Kleine Samenslag

hier werd een viertal bewerkingen uitgevoerd:

- spuiten van een PE-laag om een koperkern
- samenslaan van draden tot een kwartet
- omspinnen van de kwartetten
- overspoelen van de kwartetten.

– Grote Samenslag

hier werden twee bewerkingssoorten onderscheiden:

- meervoudig samenslaan van kwartetten tot kernen in één of in twee stappen afhankelijk van het aantal kwartetten
- armeren waarbij de kabels worden omwikkeld met staaldraad

- *Vlechten*
het aanbrengen van kopervlechtwerk om de kabels.
- *Sputen*
het aanbrengen van een kunststof laag om de kabelkern. Er worden verschillende opeenvolgende spuitbewerkingen uitgevoerd die door de meeste machines kunnen worden uitgevoerd.
- *Kabelafwerking*
de kabels worden overgespoeld op de juiste lengte, getest en verpakt volgens klantspecificatie.

Het productieproces wordt ongeveer in bovenstaande volgorde in tien tot twaalf bewerkingsstappen doorlopen. Het goederenstroomschema en processchema met enkele daarbij behorende grootheden is weergegeven in figuur 2.

Grote verschillen in machinesnelheid per artikel treden op bij de kwartetmachine in de Kleine Samenslag omdat er met verschillende spoed samengeslagen wordt en bij de spuitmachines omdat voor dikke kabels meer massa nodig is dan voor dunne.

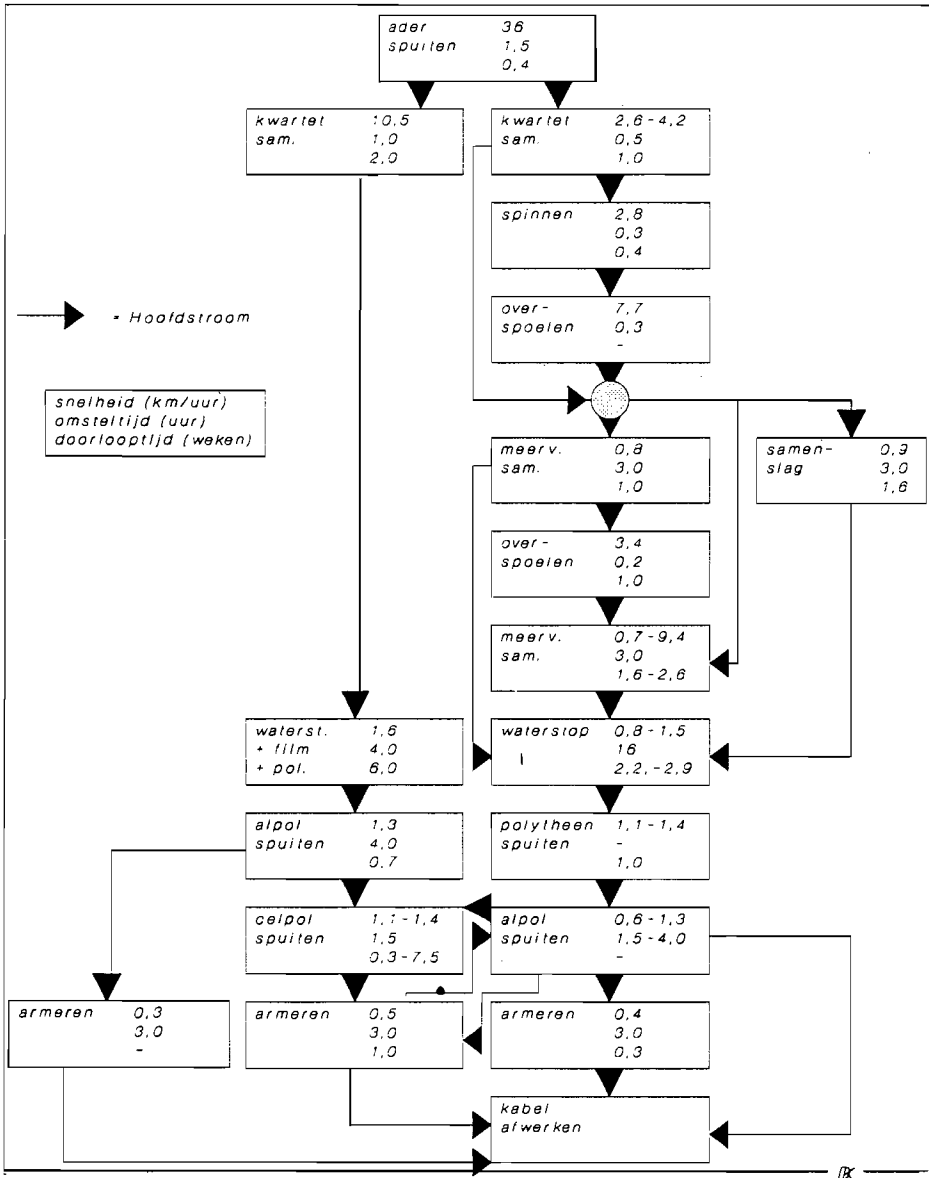
Ook bij dezelfde bewerking kan er voor hetzelfde produkt sprake zijn van een snelheidsverschil tussen de verschillende machines. Onafhankelijk van de produktvolgorde over een bepaalde machine werd rekening gehouden met een vaste omsteltijd. Met name bij twee spuitmachines bleek echter dat de normomsteltijd fors overschreden werd omdat de kleurvolgorde een belangrijke rol speelt. Bovendien werd er geen rekening gehouden met de insteltijden die optreden indien er een nieuwe produktgroep gaat lopen, onder andere bij het Waterstop spuiten. Een hogere bezettingsgraad en een langere doorlooptijd waren het gevolg.

Onderstaande tabel 1 geeft het aantal uren weer, dat nodig is geweest voor de productie van het GPEW-pakket in 1988.

Tabel 1. Capaciteitsbeslag GPEW-pakket

	<i>Machinecapaciteit in uren</i>		
	<i>GPEW</i>	<i>50*4</i>	<i>1*4</i>
Kleine Samenslag	5875uur (42%)	2366	207
Grote Samenslag	8734uur (21%)	546	5666
Sputen	3966uur (11%)	388	2408

Tussen haakjes staat het percentage van de capaciteit dat het totale GPEW pakket in beslag nam in de betreffende bewerkingsgroepen; de overige capaciteit wordt benut voor het maken van producten van de andere PMC's.



Figuur 2. Proces- en goederenstroomschema GPEW-kabel

Uit de tabel blijkt dat de Waterstop machines in de Smitafdeling vrijwel alleen gebruikt werden voor GPEW-producten.

In de Grote Samenslag varieerde het aandeel van de GPEWkabels tussen de 17% en de 80%. In de overige groepen was de afhankelijkheid van andere produkt-

groepen groot. Dit verschijnsel zal overigens niet in het verdere onderzoek worden betrokken.

De mate waarin componenten of halffabrikaten voorkomen in verschillende eindprodukten wordt *commonality* genoemd; het aantal verschillende uitvoeringen van een bepaalde component heet *diversiteit*. Inzicht in de diversiteit is van belang vanwege de invloed op de besturing van de goederenstroom.

Hieronder is de situatie bij GPEW schematisch weergegeven; de tussen haakjes geplaatste getallen geven per produktiefase het aantal uitvoeringen aan.



Diversiteit in GPEW-groep

Uit het *commonality*-overzicht blijkt dat, op het nivo van de tot kabelzielen samengeslagen kwartetten, reeds bijna volledig vastligt tot welk eindprodukt het half-fabriekaat verwerkt zal worden.

4. De huidige wijze van goederenstroombesturing

De Business Unit (BU) verzamelde alle orders die binnen kwamen bij de commerciële afdeling (CA), en stelde een produktieplan op. Hiervan werd de materiaalbehoefte bepaald. Vervolgens vond een globale capaciteitstoets plaats. De produktie-orders werden op basis van klantenorders afgegeven aan het Bedrijfsbureau.

Het Bedrijfsbureau (BB) bepaalde naar aanleiding van de ontvangen produktie-orders de te produceren aantallen, rekening houdend met capaciteitsbeslag en voorraadsituatie. Was de gevraagde levertijd niet haalbaar dan werd een andere levertijd afgegeven.

Klantenorders werden samengenomen tot produktie-opdrachten en ingepland op een planbord. Hierbij werd een doorlooptijd-norm gehanteerd van één week per bewerking.

In het gehele fabricagetraject werd gewerkt op klantenorder. Hierdoor kwam de totale geplande fabricagedoorlooptijd op tien tot twaalf weken.

Als het tijd was om de productie-opdracht te starten dan werd deze tenslotte uitgegeven aan de productie-afdeling.

Als ordervoorbereidingstijd gold de tijd die verstreek tussen de orderontvangst en het uitgeven van de productieopdracht.

De ordervoorbereidingstijd lag tussen 12 en 38 dagen; de grote spreiding werd vooral veroorzaakt door wachten op beschikbare capaciteit.

Het BB zorgde ervoor dat de benodigde uitgangsmaterialen aanwezig waren en hield de voortgang van de productie bij.

5. Probleem-analyse

De problemen die in het hiervoor beschreven onderzoek naar voren zijn gekomen, kunnen in twee categorieën worden ingedeeld.

– *Ordervoorbereiding*

- De som van de geplande doorlooptijden was groter dan de gevraagde levertijden; de toegezegde levertijden weken in 12% van de gevallen af van de gevraagde levertijden en waren gemiddeld drie weken langer.
- Klantenorders werden aangenomen tot boven de beschikbare capaciteit.
- Klantenorders bleven vaak wachten tot zij met andere orders (met andere levertijden) konden worden samengevoegd tot één productie-opdracht; te grote series verstoppden de doorstroming
- Indien er een levertijd was gevraagd, die niet werd bevestigd door de planner, dan werd de gewijzigde levertijd ingevoerd in het orderregistratiesysteem. Als bleek dat de afgegeven levertijd niet kon worden gehaald dan werd een nieuwe levertijd afgegeven en de eerder in het systeem ingevoerde levertijd overschreven. Zodoende kon de werkelijke levertijdprestatie niet worden gemeten.

– *Productieproces*

- Het gehele, uit vele bewerkingen bestaande, fabricagetraject moet binnen de gevraagde levertijd worden doorlopen.
- Het capaciteitsbeslag op de machines werd berekend op basis van bewerkingstijden op voorkeursmachines. Het komt voor dat er uitgeweken wordt naar machines met een lagere snelheid, het geen meer capaciteit vergt dan was voorzien.

- Door de grote verschillen in machinesnelheden die bestaan tussen opeenvolgende bewerkingen ontstonden tussenvoorraden.
- De norm-doorlooptijd van één week per bewerking is niet realistisch en werd bijna altijd overschreden, met name bij de waterstopbewerking en de spuitbewerking.
- Omdat de prestatie van de bewerkingsgroepen werd afgemeten aan het behaalde machinerendement, bestond de neiging om grote series het eerst in bewerking te nemen. Van de kleine series werden de toegezegde levertijden daardoor vaak niet gehaald.

Op twee manieren kan worden bereikt dat de doorlooptijd beter in overeenstemming is met de gevraagde levertijden.

- Ten eerste door het verkorten van de doorlooptijd zelf, en
- ten tweede door het verkorten van het produktietraject waarvoor een levertijd wordt afgegeven.

Om dit te bereiken komen de volgende maatregelen in aanmerking:

- Het 'klantenorderontkoppelpunt' (KOOP) dat een deel van de goederenstroom waarin op klantorder wordt gewerkt scheidt van het op voorraad bestuurd deel, moet naar een gunstiger plaats worden geschoven¹. Die plaats wordt bepaald door een afweging van de factoren, voorraadkosten, de vereiste levertijd en de diversiteit van de produkten in het KOOP.
- Waar mogelijk moet van een flow-opstelling worden gerealiseerd, waar de produkten in een continue stroom worden geproduceerd. Wachttijden tussen de verschillende bewerkingen worden dan vermeden, omdat de produkten na gereedkomen direct worden doorgeschoven naar de volgende bewerking. Als dit niet mogelijk is, moet het aantal bewerkingsstappen worden verminderd en de doorlooptijdnormen worden verkort.
- De doorlooptijden moeten per bewerking zodanig worden vastgesteld dat zij weliswaar zo kort mogelijk maar tevens realistisch zijn.
- Door verkleinen van de produktieserie zal zowel de bewerkingstijd als de wachttijd dalen. Doordat er dan echter vaker omgesteld moet worden, kan de bezettingsgraad zodanig toenemen dat daarmee ook de doorlooptijd weer langer wordt.
- Bij het in bewerking nemen van productie-opdrachten moeten zodanige prioriteitsregels worden gehanteerd dat daardoor, en door een verbeterde voortgangscontrole het aantal levertijdoverschrijdingen minder wordt.
- De capaciteitsbezettingsgraad moet beter worden beheerst met name door een betere werklastbepaling en een gelijkmatiger verdeling.
- De mogelijkheden tot prestatiemeting op logistiek moeten worden verbeterd. Dit punt zal echter in dit verslag niet nader worden behandeld.
- Tenslotte is het nog mogelijk om te onderzoeken of de order voorbereidingsprocedure kan worden verkort. Ook hieraan zal binnen het kader van dit artikel geen aandacht worden geschonken.

6. Het klantenorderontkoppelpunt

Het klantenorder-ontkoppelpunt (KOOP) is een voorraadpunt dat in de goederenstroom de scheiding vormt tussen: het deel dat aangestuurd wordt door klantenorders, en het deel dat daarvoor ligt en prognose-gestuurd is.

De juiste plaats van het ontkoppelpunt wordt bepaald door een aantal factoren:

- de gevraagde levertijd in relatie tot de doorlooptijd van de op klantenorder uit te voeren bewerkingen
- de voorraadkosten in het KOOP die voor een deel bestaan uit de toegevoegde waarde van de reeds uitgevoerde bewerkingen
- het risico incourant dat groter wordt naarmate de produkten meer bewerkt en dus specifieker zijn.

Voordeel van het stroomafwaarts verschuiven van het KOOP is het korter worden van de levertijd die wordt bepaald door de resterende doorlooptijden en de beschikbaarheid van goederen in het KOOP.

Nadeel is de toenemende specificiteit van de componenten in het voorraadpunt en derhalve een afnemende 'mix-flexibiliteit'.

Het volgende kan nu worden vastgesteld. Na de eerste bewerkingen die volgen op het onspinnen en overspoelen is er al direkt sprake van specifieke componenten. Daarom is het wenselijk om het KOOP direkt na de Kleine Samenslag te leggen. Hiermee ligt echter ook de doorlooptijd na het KOOP vast.

In het produktenpakket GPEW is een groep te onderscheiden waarvoor wel regelmatige en een groep waarvoor géén regelmatige afname is. In het KOOP wordt alleen voorraad gehouden voor componenten behorende tot de eerstgenoemde categorie; de voorraadhoogte dient zodanig te zijn dat kan worden voldaan zowel het gemiddelde als de spreiding van de voorspelfout gedurende de levertijd.

Voor de tweede groep produkten is het niet zinvol om voorraden aan te leggen. Voor deze produkten moet dus rekening gehouden worden met een langere levertijd.

Een vergelijking van de noodzakelijke veiligheidsvoorraad als functie van een gewenste service-graad voor diverse mogelijke posities van het KOOP in de goederenstroom bevestigde de juistheid van het eerder aangenomen uitgangspunt dat het KOOP na de Kleine Samenslag moet liggen.

Overigens wordt naast mix-flexibiliteit nog gesproken over volume-flexibiliteit, als het gaat om de mate waarin voldaan kan worden aan een onverwachte verhoging in volume van het orderpakket. Deze vorm van flexibiliteit wordt bepaald, door enerzijds de bezettingsgraad van de capaciteitsgroepen, en anderzijds door de beschikbaarheid van de materialen waarvan wordt uitgegaan.

7. Voorstel goederenstroombesturing vóór het KOOP

– Voorraadbeheersing

Bij de beheersing van de voorraden in het KOOP is gekozen voor een systeem dat uitgaat van de totale voorraadhoogte van alle daar aanwezige produktsoorten. Daarbij speelt het bestelniveau een rol. Het bestelniveau is gelijk aan de som van veiligheidsvoorraad en werkvoorraad.

Iedere keer als de voorraad daalt beneden het bestelniveau wordt een vooraf vastgestelde aanvulserie besteld.

Met werkvoorraad wordt bedoeld de goederen die op voorraad liggen omdat het verbruik van een aanvulserie enige tijd duurt.

Uitgaande van een toelevertijd van anderhalve week en een leverbetrouwbaarheid van 95% is het bestelniveau bepaald op 610 km. Als aanvulserie is op praktische gronden 630 km gekozen; onder aanvulserie wordt hier verstaan de totale produktieserie die alle aan te maken produktsoorten bevat.

Van de totaalserie dienen vervolgens de deelseries per produkt te worden bepaald. De hiervoor toe te passen regel⁵ luidt:

$$I^* = (t + 1) \cdot G + k \cdot S \cdot \sqrt{t + 1}$$

$$\text{met } k = (\Sigma I - \Sigma(t + 1) \cdot G) / (\Sigma(t + 1) \cdot S)$$

waarbij:

I^* = optimale voorraadniveau na toewijzing van de ideëelserie van een bepaald produkt

I = aktuele voorraadniveau

ΣI = som van de voorraden van alle produkten

t = doorlooptijd van het produkt

k = kans op buiten voorraad raken gedurende t

G = gemiddelde afname gedurende t

S = spreiding van de afname gedurende t .

De deel-serie Q is nu de serie die het huidige voorraadniveau per produkt aanvult tot het optimale niveau: $Q = I^* - I$.

– Doorlooptijd vóór het KOOP

In een opeenvolgende reeks bewerkingen bepaalt de langzaamste machine de doorstroomsnelheid.

Er zijn twee aderspuitlijnen met snelheden van respectievelijk 40 en 20 km/uur; samen 60 km/uur. De snelheid van elke machine varieert enigszins afhankelijk van de spoed waarmee de aders worden samengeslagen.

Er zijn drie kwartetmachines; de gemiddelde snelheid is 3,5 km/u per machine. In totaal dus samenslagcapaciteit van 10,5 km/uur

Aangezien voor de produktie van één kwartet vier aders nodig zijn, dient om te kunnen vergelijken, de snelheid van het aderspuiten te worden gedeeld door vier: 15 km/uur.

De conclusie is derhalve dat de kwartetmachines het knelpunt vormen.

De totale aanvulserie van 630 km komt overeen met een kwartet-afname van twee weken. Als doorlooptijd van de Kleine Samenslag wordt anderhalve week gehanteerd.

Gebruikmakend van de verdeelsleutel zoals die beschreven is in voorgaande paragraaf geeft tabel 2 de produktieseries per component, met de daarbij behorende bewerkingstijden. Hierbij is rekening gehouden met de verschillen in produktiesnelheden. Er is gerekend met volle klossen per halffabrikaat; aders 16 km en kwartetten 2,6 km per klos.

De aanvulserie wordt door dit afronden 642 km.

In de tabel staan alleen de produktieseries voor het kwartettenslaan, omdat dit het knelpunt is. Er mag geen stilstand ontstaan op deze machines. Gedurende de 'run-out time' van de kwartetmachines dienen de aderlijnen dus voldoende te produceren om de kwartetmachines van uitgangsmateriaal te voorzien.

De run-out time is de tijd waarin een machine een stel van vier volle aderklossen, elk van 16 km, verbruikt. De gemiddelde produktie-snelheid is 3,5 km/uur. De run-out time is dus: $16/3,5 = 4,6$ uur.

Er zijn in totaal niet meer dan vier kleuren aders.

Tabel 2. Produktseries in de Kleine Samenslag

kwartet soort	serie			bewerkingstijd in uren		
	G	S	grootte	kwartet	spinnen	spoelen
1	11,43	3,03	41,6	11,9	14,9	5,4
2	7,33	1,36	20,8	5,9	7,4	2,7
3	7,33	1,36	20,8	5,9	7,4	2,7
4	3,42	1,27	15,6	4,5	5,6	2,0
5	3,91	1,69	20,8	5,9	7,4	2,7
6	4,10	2,84	31,2	8,9	11,1	4,1
7	35,22	7,69	109,2	31,2	—	—
8	30,88	7,55	104,0	29,7	—	—
9	46,85	10,34	145,6	41,6	—	—
10	42,94	9,38	132,6	37,9	—	—
Totaal			642,2	183,4	53,8	19,6

doorlooptijd $t = 0,6$ weken

G = gemiddelde afname in de doorlooptijd

S = spreiding van de afname in de doorlooptijd

Om de drie kwartetmachines van voldoende uitgangsmateriaal te voorzien dient per kleur dus $3 \cdot 16 = 48$ km ader geproduceerd te worden gedurende iedere cyclus van 4, 6 uur. Omdat de aderlijnen in snelheid verschillen kan aan die eis het beste worden voldaan door op de snelle lijn (40 km/uur) drie kleuren en op de langzame lijn (20 km/uur) twee kleuren te produceren. Tabel 3 toont het produktieschema van een volledige cyclus. De overblijvende tijd is ruim voldoende voor omsteltijd en eventualiteiten.

Tabel 3. Het aderspuit schema

aderlijn 1	wit	orange	rood		
aderlijn 2	blauw				
tijd	0	1,2	2,4	3,6	4,8

– *Produktieregeling van de Kleine Samenslag*

Er zijn twee groepen kwartetten te onderscheiden:

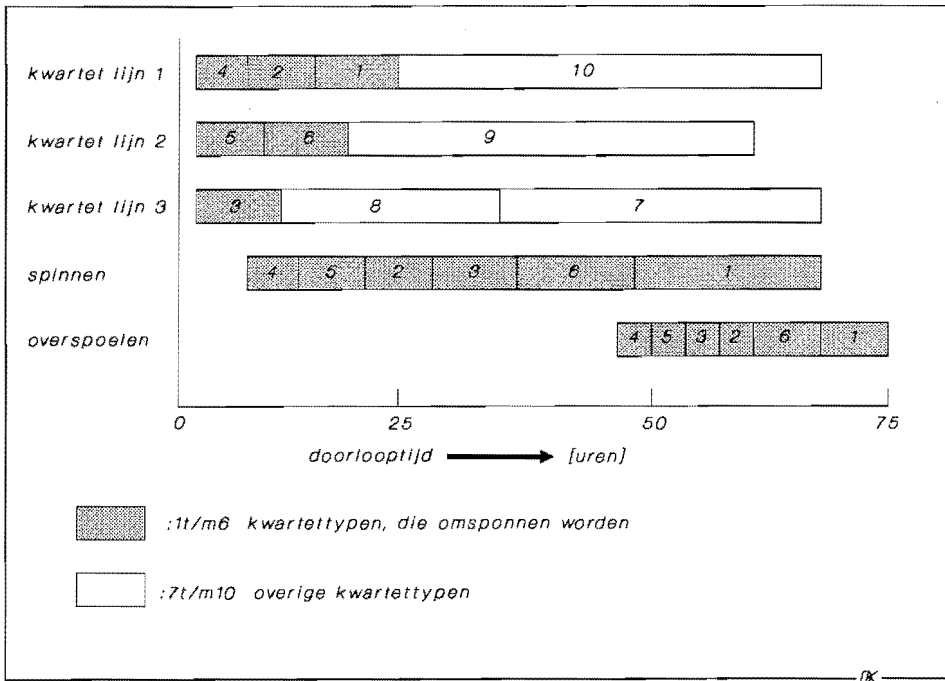
- kwartetten, die alleen samengeslagen worden
- kwartetten die ook omspinnen en overgespoeld worden.

Uit het oogpunt van omstelkosten maakt het geen verschil uit in welke volgorde de verschillende kwartetten worden samengeslagen. De kwartetten die worden omspinnen en overgespoeld, kunnen derhalve het eerst worden samengeslagen om vervolgens te worden omspinnen en overgespoeld.

Rekening houdend met de bewerkingstijden die in tabel 2 zijn gegeven is in figuur 3 een produktieschema samengesteld met een zo kort mogelijke totale doorlooptijd voor het gehele pakket van viermaal 48 km.

Daarbij is, om een zo kort mogelijke doorlooptijd te verkrijgen, als tweede indelingsregel gehanteerd 'kortste bewerking eerst'.

Uit de figuur blijkt dat de doorlooptijd op deze wijze is teruggebracht tot 70 á 80 uur (0,63 weken). Aangezien er bij de berekening van de voorraadhoogte (in paragraaf Voorraadbeheersing) met een doorlooptijd van 1, 5 weken gerekend is, betekent dit dat zowel de veiligheidsvoorraad als werkvoorraad kunnen worden verlaagd met respectievelijk 35% en 58%. Het bestelniveau komt dan te liggen op 285 km.



Figuur 3.

De volgende activiteiten, nodig voor het beheersen van de goederenstroom vóór het KOOP, kunnen nu worden onderscheiden:

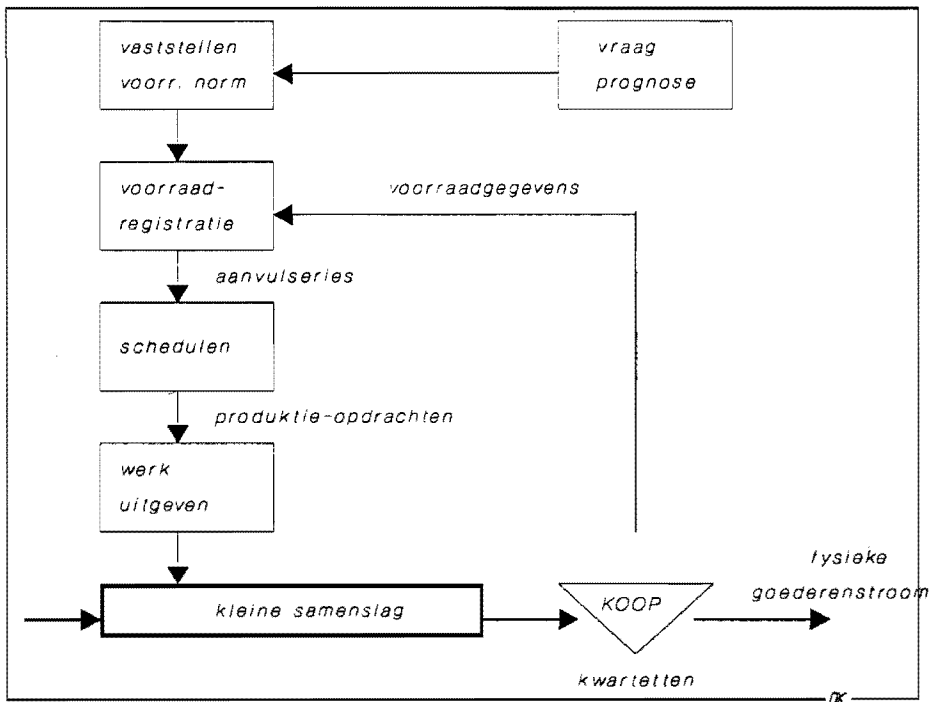
- voorraadregistratie in het KOOP ten behoeve van het BB
- het uitgeven van aanvulorders en het vaststellen van produktieseries door het BB
- het maken van de produktieproduktieprogramma's door het BB
- het voorspellen van de afname door de BU aan de hand van CA-gegevens.

De genoemde functies zijn in figuur 4 in hun onderlinge relatie weergegeven.

8. Voorstel goederenstroombesturing ná het KOOP

- *Samenvoegen van bewerkingen*

In het traject na het KOOP wordt gewerkt op klantenorders. Dit vereist korte en vooral betrouwbare doorlooptijden. Om het vraagstuk van de doorlooptijd-beheersing te vereenvoudigen zal eerst worden bekeken of het mogelijk is om bewerkingen organisatorisch samen te voegen tot productie-eenheden (PE). Door het samenvoegen van bewerkingen neemt het aantal te besturen eenheden



Figuur 4. Productieschema in de Kleine Samenslag

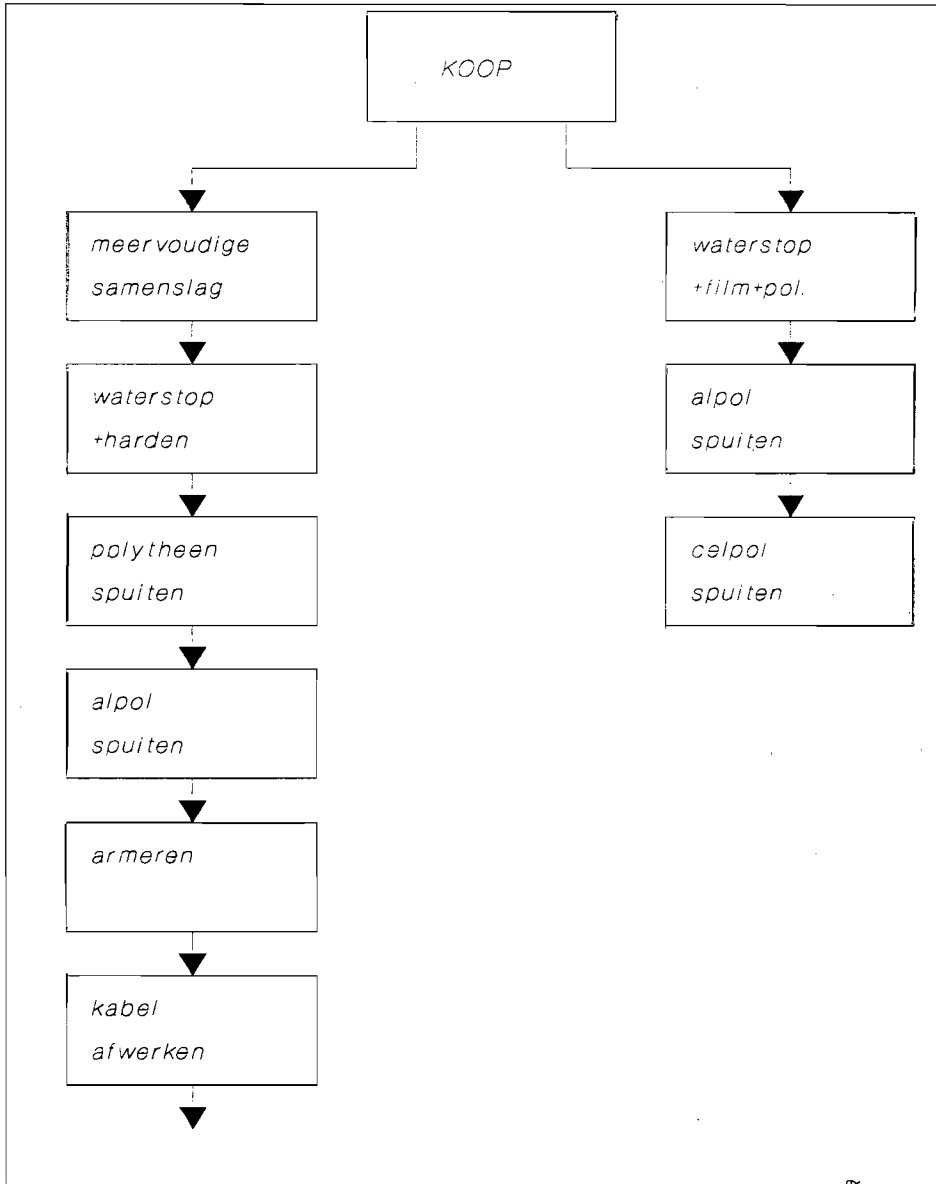
af en daarmee de besturingslast. Daarna wordt getracht om te komen tot korte en betrouwbare levertijden.

Opeenvolgende bewerkingen kunnen met goed gevolg worden samengenomen tot PE's indien het mogelijk is de bewerkingen met weinig onderlinge tijdspeling uit te voeren en als tevens de afhankelijkheid van andere PE's gering is⁶. De PE wordt dan in de planning opgevat als één capaciteitsbron met één bepaalde produktiesnelheid.

Uitgaande van het processchema in figuur 2 wordt het vereenvoudigde schema geschetst in figuur 5.

Er ontstaan na het formeren van PE's twee beheersingsniveaus⁶:

- beheersing van de goederenstroom *tussen* de PE's met name seriegroottebepaling, fasering en werklustbeheersing door het bedrijfsbureau
- beheersing van de goederenstroom *binnen* de PE met name doorlooptijdbeheersing.



Figuur 5. Beheersingsstructuur voor het KOOP

In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk wordt hier nader op ingegaan.

– *Doorlooptijdverkorting*

Doorlooptijd bestaat naast bewerkingstijd uit wachttijd. De factoren die de wachttijd bepalen zijn :

- capaciteitsbezettingsgraad (r)
- gemiddelde bewerkingstijd (E_v)
- variatiecoëfficiënt van de bewerkingstijd (C_{sv})

Als de volgorde van het in bewerking nemen van orders 'First In, First Out' is, dan wordt het quotiënt van gemiddelde wacht tijd (E_w) en gemiddelde bewerkingstijd (E_v) gegeven door de formule van Pollaczek:

$$\frac{E_w}{E_v} = \frac{r}{2 \cdot (1-r)} \cdot (1 + C_{sv}^2)$$

Het verband tussen bezettingsgraad en doorlooptijd dat uit de formule is af te leiden is geschetst in figuur 6.

In deze figuur is te zien dat bij een bezettingsgraad die toeneemt boven 70 à 80% de doorlooptijd veel sterker toeneemt. Tevens blijkt dat indien de gemiddelde serie groter wordt, de doorlooptijd ook stijgt.

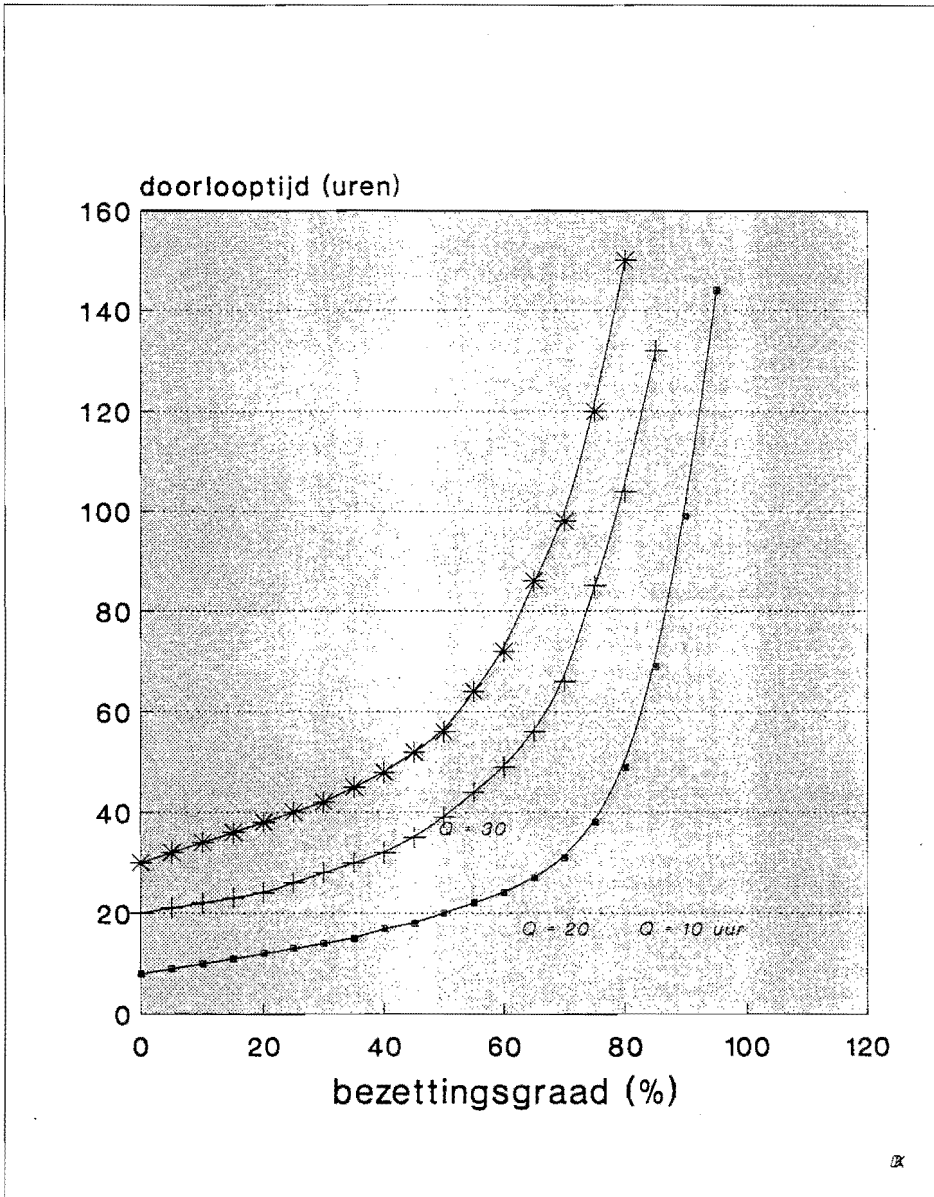
Uit de formule blijkt verder dat als de bewerkingstijden van de orders die 'in de rij staan' voor een bewerkingsstation te veel van elkaar verschillen de wachttijden ook toenemen.

Uit de andere formules, die hier echter niet zijn gegeven, blijkt nog dat een gelijkmatige binnenkomst van orders de doorlooptijd gunstig beïnvloedt.

Op grond van de wachttijdtheorie die zojuist is beschreven zal nu voor het bedrijf worden berekend wat de doorlooptijden zouden moeten zijn. De uitgangsgegevens voor de berekening zijn:

- de bezettingsgraad die volgt uit het productieplan van de CA, waarin de geplande productie-uren per machine staan
- de bewerkingstijden, uitgaande van de huidige seriegroottes inclusief de steltijden.

In tabel 4 zijn de resultaten van de doorlooptijdberekening opgenomen. De doorlooptijden zijn per PE een gemiddelde van de doorlooptijden per bewerking en worden in de laatste kolom afgerond op veelvoud van een halve week (120 uur). Deze doorlooptijden moeten door het Bedrijfsburo gehanteerd worden bij het bepalen van de interne levertijden.



Figuur 6. Relatie tussen doorlooptijd en bezettingsgraad bij variërende seriegroote Q.

Tabel 4. Gemiddelde doorlooptijden per productie-eenheid

<i>productie-eenheid</i>	<i>doorlooptijd uren</i>	<i>weken</i>
Grote Samenslag en overspoelen	39,7	1/2 wk
waterstop	26,79	1/2 wk
polytheen spuiten	142,0	1 wk
alpol spuiten 2	111,4	1 wk
armeren	44,1 of 266,6	1/2 wk 2 wk
waterstop + film + pol.	273,0	2 wk
alpol spuiten 1	136,9	1 wk
celpol spuiten	334,3	2 wk

Voor het armeren zijn twee doorlooptijden afgegeven, omdat in deze PE sprake is van een korte en een lange route.

Door figuur 5 te betrekken op tabel 4 kan worden afgeleid dat de totale gemiddelde doorlooptijd bij invoering van PE's tussen de 3, 5 en 5 weken komt te liggen. De doorlooptijd van de Kabelafwerking is hier nog niet bij opgeteld; deze wordt door het Bedrijfsburo op twee weken gesteld. De totale fabricage-doorlooptijd wordt daardoor 5, 5 à 7 weken.

Vergeleken met de huidige geplande doorlooptijden van tien tot twaalf weken is dus een aanzienlijke verkorting van de doorlooptijd bereikt van vijf tot zes weken.

De incurante eindprodukten hebben een langer produktietraject omdat zij geen KOOP hebben. Bij de doorlooptijd na het KOOP moet daarom de doorlooptijd van de kleine samenslag worden opgeteld; deze is gesteld op één week. De totale gemiddelde doorlooptijd voor incurante produkten komt daarmee op 6, 5 weken.

Eén van de gevolgen van het eventueel verkleinen van de produktieseries zou zijn dat daarmee, volgens Pollaczek, de doorstroomsnelheid wordt verhoogd. Kleinere series betekent echter ook vaker omstellen met als gevolg een hogere bezettingsgraad van de beschikbare capaciteit.

Bij een aantal machines blijkt de bezettingsgraad al zo hoog, of de steltijd zo lang te zijn, dat serieverkleining niet mogelijk is. Als het echter mogelijk is om dit probleem op te lossen dan is het effect van het halveren van de seriegrootte berekend met de formule van Pollaczek. Het resultaat is weergegeven in tabel 5.

Tabel 5. Gemiddelde doorlooptijden bij een seriegrootte van 12,5 km

productie-eenheid	doorlooptijd uren
grote samenslag en overspoel	18,3
waterstop	13,8
polytheen spuiten	71,0
alpol spuiten 2	71,7
armeren	25,2 of 147,2
waterstop + film + pol.	136,5
alpol spuiten 1	68,5
celpol spuiten	167,2

Uit vergelijking tussen de tabellen 4 en 5 blijkt dat de doorlooptijd 35% tot 50% korter is geworden. Dit komt ruwweg overeen met een verlaging van het onderhanden werk ter waarde van f 765. 000. Het verkleinen van de serie's zou het beste kunnen gebeuren door verschillende klantenorders voor hetzelfde produkt niet meer samen te voegen tot één produktie-opdracht; vooral niet als de respectievelijke levertijden veel verschillen.

– *Uitgifte en in bewerking nemen van produktieopdrachten*

Het Bedrijfsburo geeft produktie-opdrachten aan de produktie-eenheid (PE). De normdoorlooptijden per PE, zoals die berekend zijn in tabel 4 of 5, worden gebruikt om interne levertijden van een produktie-opdracht vast te stellen. Interne levertijden zijn de geplande gereedheidsmomenten per PE. Daarbij mag de afgesproken seriegrootte en de aan te houden maximale bezettingsgraad niet worden overschreden. Bij het vaststellen van de werklust moet worden uitgegaan van de werkelijke machinesnelheden en omsteltijden.

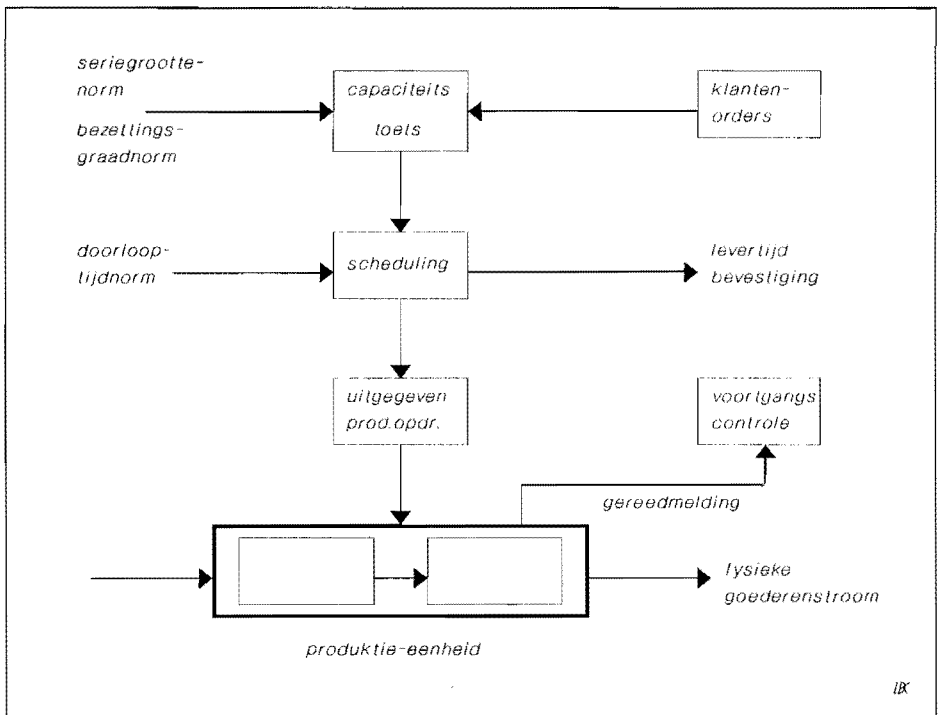
In de praktijk zal het echter toch voorkomen dat het bezettingsprofiel pieken en dalen vertoont. Om de werklust toch zo constant mogelijk te houden wordt aanbevolen om bepaalde snellopende produkten reeds op voorhand te produceren als daar gelegenheid toe is. Hierdoor wordt enerzijds als het ware een capaciteitsbuffer aangelegd. Anderzijds gaat door het creëren van stopwerk geen capaciteit verloren in periodes waarin er weinig orders zijn.

Bij het kiezen van de volgorde waarin de ontvangen produktie-opdrachten daadwerkelijk in de bewerking worden genomen, moet de PE gebruik maken van prioriteitsregels.

Een regel die de gemiddelde doorlooptijd gunstig beïnvloedt is de regel 'kortste

bewerking eerst' (KBE)². De orders met de langste bewerkingstijd lopen daarbij echter een grote levertijdoverschrijding op. Daarom wordt aanbevolen om in eerste aanleg gebruik te maken van een regel die prioriteit verleent aan de order met de kleinste tijdsspelning (beschikbare tijd minus bewerkingstijd). De prioriteit wordt voor iedere bewerking afzonderlijk vastgesteld, uitgaande van de interne levertijd. Daarbij kunnen prioriteitsklassen worden gehanteerd waar binnen dan weer de KBE-regel geldt.

In figuur 7 worden de activiteiten ter beheersing van het produktietraject ná het KOOP in hun onderlinge samenhang weergegeven. Samen met tabel 4 vormt dit de beheersingsstructuur van de totale goederenstroom.



Figuur 7. Beheersingsstructuur na het KOOP

9. Samenvatting en aanbevelingen

Het productieproces valt uiteen in vijf bewerkingsgroepen. In het gehele fabricagetraject werd op klantenorder gewerkt. In totaal moeten, afhankelijk van het produkttype, acht tot zestien bewerkingen worden doorlopen. Een belangrijk aspect bij het bepalen in welk deel van het fabricagetraject op klantenorder kan worden gewerkt, is de commonality waaruit blijkt waar in de produktopbouw halffabrikaten specifiek worden voor eindprodukten.

De doorlooptijd wordt bepaald door machine-snelheid, omsteltijd, bezettingsgraad en seriegrootte. Daarbij bleek dat er grote verschillen in machine-snelheden zijn, ook binnen een bewerkingsgroep en dat onafhankelijk van de produktvolgorde ten onrechte geen rekening werd gehouden met verschillen in omsteltijd als er sprake was van een volgordevoorkeur.

Klantenorders werden samengevoegd tot één produktie-opdracht. Bij het in bewerking nemen bestaat een voorkeur voor grote series. In een aantal gevallen werd de doorlooptijd van de kleine series dan ook fors overschreden.

Bij het plannen wordt een doorloopsnelheid van één week per bewerking aangehouden. Bij meting werd een fabricagedoorlooptijd van tien tot vijftien weken geconstateerd.

Jaarlijks werd er uitgaande van een capaciteitstoets een produktieplan opgesteld. De werkelijke afname vertoonde echter grote afwijkingen met dit plan hetgeen grote consequenties had voor de werkelijke bezettingsgraad.

Aanbevolen wordt om uit opeenvolgende bewerkingsgroepen een beperkt aantal produktie-eenheden samen te stellen; het KOOP komt dan na de PE – kleine samenslag – te liggen.

In het produktietraject vóór het KOOP wordt dan op voorraad gewerkt. Door de produktie als 'flow'-proces te besturen vermindert de doorlooptijd hier van anderhalve week tot één week.

De voorraad in het KOOP moet beheerst worden middels een BQ-systeem. Uitgaande van een doorlooptijd van 1, 5 weken moet de hoogte van het bestelniveau van de totale voorraad en de totale aanvulserie respectievelijk 285 km en 642 km zijn.

In het trajectdeel na het KOOP bleek het niet mogelijk om flow-produktie toe te passen. De doorlooptijden in de betreffende PE's werden berekend met de formule van Pollaczek. De doorstroming van orders moet gepland worden aan de hand van deze doorlooptijdnormen en vastgelegd in interne levertijden. De fabricagedoorlooptijd wordt dan 5, 5 á 7 weken.

Halvering van de produktieseries kan een verdere verkorting van de doorlooptijd met ongeveer 40% tot gevolg hebben, mits getracht wordt om bij bepaalde machines de steltijd of de bezettingsgraad te verminderen.

Bij het streven naar een gelijkmatige en niet te hoge capaciteitsbezetting moet gebruik worden gemaakt van een 'capaciteitsbuffervoorraad', bestaande uit enkel snellopende produkten.

Bij het vaststellen van de werklast moet worden uitgegaan van werkelijke bewerkings- en steltijden. Het uitvoeren van werkopdrachten in de PE's moet gebeuren aan de hand van een regel die voorrang verleent aan de opdracht die de kleinste tijdsspelende heeft op de interne levertijd.

Er moet een goede logistieke prestatiemeting worden opgezet.

Literatuur

1. Bertrand, J. W. M. , Monhemius, W. , 1985, *Voortgezette produktie- en voorraadbeheersing*, TU-Eindhoven, Syllabus nr. 1. 515. 1.
2. Geraerds, W. M. J. , Bertrand, J. W. M. , Wortmann, J. C. , 1984, *Inleiding produktiebeheersing*, syllabus 1C030, TUEindhoven.
3. Monhemius, W. , 1984, *Verklaring, berekening en bestrijding van loketwachtijden*, TU-Eindhoven, Syllabus nr. 1139.
4. Brown, R. , 1967, *Decision Rules for Inventory Management*, Holt, Rinehart and Winston, New-York, (Literatuur bij Produktie- en voorraadbeheersing, Syllabus 1238, TUE).
5. Donselaar, van K. , 1988, *Safety stocknorms in divergent systems with non-identical products*, Report ARW-03 TUE / BDK/ORS/88/04, Eindhoven University of Technology.
6. Bertrand, J. W. M. , Wijngaard, J. , 1984, *The structuring of Production Control Systems*, Eindhoven University of Technology, Department of Industrial Engineering and Management Science.
7. Heij, P. , Sander, P. , 1985, *Ontwerpen van technische produktiesystemen*, Syllabus 1K030, TU-Eindhoven.
8. Knijff, P. e. , *Afstemming doorlooptijden en levertijden*. TU Eindhoven 1990.

Het afstudeerrapport van P. E. Knijff verscheen reeds eerder, herschreven door M. Igel, in *Doelmatige Bedrijfsvoering*, Jrg. 3, Nr. 4, april 1991

Een stuklijst auditsysteem

18

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. K. Vogelaar en samengevat en bewerkt door M. Igel

1. Produkt, markt en productieproces

De autoindustrie kenmerkt zich door een harde concurrentiestrijd. Naast het leveren van een goede kwaliteit is snel innoveren een must. Jarenlang werden alleen de modellen 340 en 360 geproduceerd. Het produktassortiment was dus beperkt en dat bracht risico met zich mee.

Het bedrijf heeft daarom de nieuwe 400-serie ontwikkeld en mikt daarmee op een ander marktsegment dat zich kenmerkt door luxe en sportiviteit. De auto's worden door Volvo verkocht aan importeurs. Deze voorzien op hun beurt de dealers van de gewenste types. De importeur specificeert de auto volgens een 34-cijferige code, waarin alle mogelijke keuzes en opties zijn vastgelegd.

Het produktietraject is te splitsen in vier delen:

- het persen van de plaatdelen
- carrosseriebouw
- lakstraat en
- eindmontage.

Vanaf de carrosseriebouw wordt volledig op klantenorder gewerkt. De levertijd is zes weken.

2. De afstudeeropdracht

Het bedrijf kampt met problemen in het registratieve beheer van de produktinformatie. Als gevolg daarvan is een project *configuratiebeheer* gedefinieerd met als doel het verbeteren van de werkwijze met betrekking tot het configuratiebeheer.

De afstudeeropdracht is uitgevoerd als deelproject van 'Configuratiebeheer'.

Onder configuratiebeheer verstaat men 'het beheren van de (aan de datum gerelateerde) opbouw van eindprodukten tijdens de ontwerp-, productie- en verkoopfase en in de serviceperiode'.

De afstudeeropdracht ('BOM-audit') houdt in:

'het ontwikkelen van een methode voor het verifiëren van de juistheid van configuratiegegevens en het periodiek rapporteren van een betrouwbaarheidspercentage'.

3. Produktconfiguratie

Tijdens het ontwerpproces zijn de eindprodukten nog niet als zodanig te identificeren, omdat er sprake is van een opsplitsing in functionele eenheden (motor, remmen etc.).

De definitie van configuratie luidt dus: 'produktconfiguratie is de beschrijving van een produkt op eenduidige wijze op een bepaald moment'.

Een produkt kan dan zijn een complete auto, een willekeurige samenstelling of inkoopdeel maar ook een niet fysiek bestaande (functionele) samenstelling.

Het voortbrengingsproces van produkten start met een inventarisatie van eisen uit de markt en de eigen organisatie. Dit leidt tot een produktdefinitie. Op grond van studies en onderzoek wordt de produktdefinitie steeds tastbaarder tot tenslotte de realiteitsfase bereikt wordt.

Voor de beheersing van het voortbrengingsproces is het noodzakelijk dat in alle fasen bekend is hoe de onderhanden produkten worden omschreven. Er moet zekerheid bestaan dat over dezelfde produkten wordt gesproken. Bij produktconfiguratie gaat het dus om de registratieve behandeling van de produktinformatie, niet om de technische inhoud daarvan.

Een produktconfiguratie doorloopt verschillende afdelingen: elke afdeling creëert documenten en bestanden.

Figuur 1 geeft hiervan een overzicht. De beschrijving volgt hieronder.

– *Produkt Planning*

Inventariseert de globale eisen ten aanzien van het nieuwe produkt in een 'Red Book' (RB).

Op basis van het RB wordt de General Model Specification opgesteld. De marketing-informatie is daarin verder geconcretiseerd in opties (bijvoorbeeld wel of geen sunroof).

De GMS wordt per marktgebied verder gespecificeerd in de Variant Binder (VB).

– *Marketing*

De Variant Binder (VB) dient als uitgangspunt voor de 34 cijferige code, waarmee voertuigen worden besteld.

STATUS	AFDELING	DOKUMENT	EN BESTAND	
configuratie "wished"	product planning	red book RB	general model specification GMS	variant binder VB
configuratie "designed proposed"	voorontwikkeling	principle solution PS	advanced partlist APL	
configuratie "designed planned"	ontwikkeling	constructie stuklijst KONSUL	hoofdingeling stuklijsten HIS	
configuratie "designed for building"	manufacturing engineering	fabricege stuklijst FAST-ME	adressering bouwgroep AB	bewerkings voorschrift
configuratie "transferred"	productie coördinatie	fabricege stuklijst FAST-PC	conversie tabel CI	
configuratie "ordered"	marketing	34 cijfer productiecode		
configuratie "build"	productie	doorschappen tabel TB	productie stuklijst PSL	
configuratie "ordered for service"	service	service stuklijst		

Figuur 1. Het ontstaan van de produktconfiguratie

– Voorontwikkeling

Hier heeft een eerste technische toetsing plaats van de realiseerbaarheid plaats. De eerste belangrijke technische specificaties van het produkt en proces worden vastgelegd in de Principle Solution (PS).

Tevens worden in de Advanced Parts Lists (APL) de belangrijkste onderdelen en samenstellingen van het nieuwe produkt gespecificeerd.

– Ontwikkeling

Op basis van de beproevingsresultaten wordt het produktontwerp verder ontwikkeld tot definitieve tekeningen en constructielijsten. In de constructielijst (KONSUL) zijn alle onderdelen voorzien van een produktnummer en versienummer, volgens een functionele indeling. Dit betekent dat voor iedere belangrijke functie in het voertuig (bijvoorbeeld het remsysteem) een aparte stuklijst wordt gemaakt.

Gelijktijdig wordt de Hoofdingeling Stuklijsten (HIS) vrijgegeven. In de HIS worden de voertuigvarianten aangegeven waarin de vrijgegeven constructielijst moet worden geplaatst (bijvoorbeeld het ABS-remsysteem wordt alleen in turbobuitvoeringen toegepast).

– *Manufacturing Engineering (Man. Eng.)*

De KONSUL is niet zonder meer geschikt voor het besturen van het productieproces. Op basis van de procesgerichte informatie van Ontwikkeling legt Man. Eng. de bewerkingsvolgorde vast in de fabricagestuklijst (FAST) en de bewerkingsvoorschriften (BV). De FAST is dus procesgeoriënteerd. In deze fase is de bouwgroep het hoogste niveau in de fabricagestuklijst.

De HIS wordt gebruikt bij het opstellen van de adressering bouwgroepen (AB) waarin een compleet voertuig wordt beschreven door een aantal bouwgroepen. Bij vrijgave krijgt de FAST de code 'ME'.

– *Productie Coördinatie (Prod. Coörd.)*

De FAST dient tevens als basis voor het logistieke proces. Echter, de bevoorrading gebeurt ook op basis van klantenorders. Daarom moeten de bouwgroepen worden gecombineerd met de 34-cijferige marketingcode. Het verband is echter te complex voor een directe relatie. Een oplossing is gevonden in het tussen-niveau, de componenten. Op basis van de BV en de AB worden de bouwgroepen samengevoegd tot componenten. Door een specifieke selectie van deze componenten kan nu ieder compleet voertuig worden samengesteld. De stuklijst wordt tenslotte onder code 'PC' vrijgegeven.

Figuur 2 geeft een voorbeeld van de opbouw van de FAST-PC.

– *Productie*

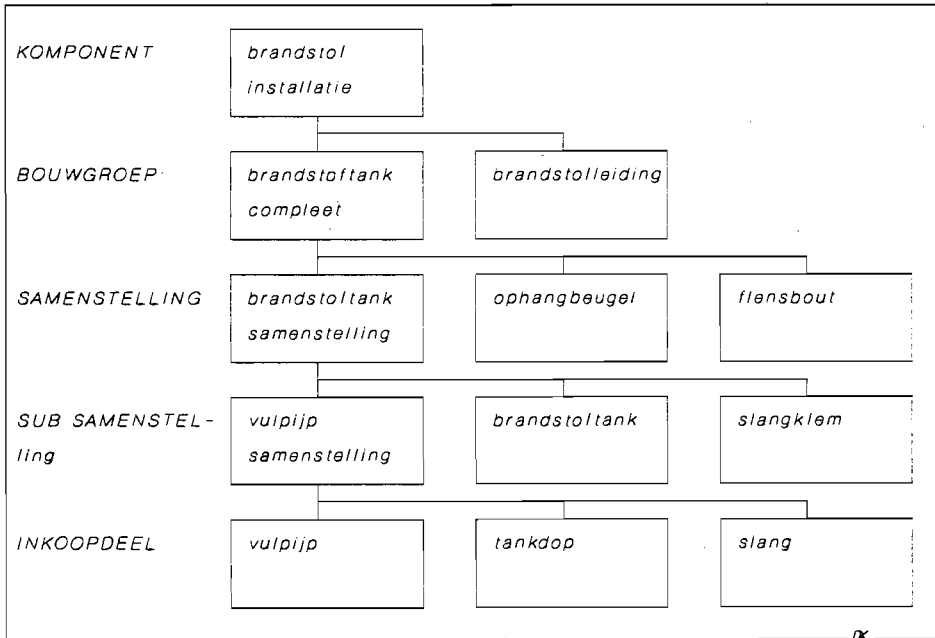
De produktiestuklijst (PSL) ontstaat door uit de FAST de actuele informatie te kopiëren; stuklijsten uit het verleden worden niet overgenomen. De feitelijke productiebesturing gebeurt op basis van de BV en PSL.

Bovendien is bij iedere auto een zogenaamde 'Boodschaptabel' (BT) aanwezig; deze geeft de uitzonderingen aan (bijvoorbeeld tijdelijke wijzigingen).

– *Service*

Op basis van de FAST worden de serviceparts geselecteerd en opgevoerd in de servicestuklijst.

Samenvattend kan worden gesteld dat het configuratiebeheer bij Volvo een groot aantal fasen kent. De producten in de autoindustrie zijn voortdurend aan wijzigingen onderhevig. In principe doorloopt zo'n wijziging het hele configuratietraject. Het gevolg is, dat door de vele vertaalslagen wijzigingen te laat worden vrijgegeven. Als echter een wijziging snel moet worden ingevoerd wordt deze tijdelijk ingevoerd zonder Man. Eng. hier in te betrekken. Zo'n tijdelijke wijziging wordt niet in KONSUL opgenomen. Dit betekent dat bestanden niet meer consistent zijn. Door het invoeren van nieuwe methoden met betrekking tot het configuratiebeheer wil het bedrijf de situatie in dit opzicht verbeteren.



Figuur 2. Fabricagestuklijst

4. De huidige auditing van configuratie gegevens

Om de huidige audit-activiteiten te beschrijven zijn de bestanden ingedeeld in informatiegroepen. Deze informatiegroepen zijn gebaseerd op toepassingsgebied (zie figuur 1).

– Marketing-informatie (RB, GMS en VB)

Het gaat hier om ideeën en wensen die richting geven aan het produktbeleid. Er bestaat geen systematische audit. Fouten in de VB kunnen leiden tot afwijkingen in de 34-cijferige code waardoor voertuigen onjuist zijn gespecificeerd.

– Voorontwikkelings-informatie (APL en PS)

Er zijn geen eisen vastgelegd voor inhoud van overdracht van informatie van voorontwikkeling aan ontwikkeling.

De overdracht van voorontwikkeling aan Man. Eng. is wel vastgelegd, maar nog niet operationeel. Fouten in de PS en APL leiden tot verkeerde specificaties in de ontwikkelingsinformatie.

– Ontwikkelingsinformatie (KONSUL en HIS)

Bij vrijgave van de KONSUL en HIS worden deze door Prod. Coörd gecontroleerd op compleetheid. Er bestaan geen auditprocedures voor de ontwikkelingsinformatie. De gevonden afwijkingen worden wel teruggekoppeld naar de

constructeur, maar niet geregistreerd. Er bestaat dan ook weinig inzicht in het aantal en de soort afwijkingen. Fouten in de ontwikkelingsinformatie kunnen verkeerde produktspecificaties in de FAST en aan de leveranciers tot gevolg hebben.

– *Procesvoorbereidingsinformatie (FAST en AB)*

Op basis van de AB koppelt Prod. Coörd. de FAST aan de betreffende componenten. Gevonden afwijkingen worden gemeld aan Man. Eng. . Er heeft geen registratie plaats. Verkeerd geadresseerde bouwgroepen kunnen tot gevolg hebben dat de verkeerde materialen worden toegepast.

– *Logistieke informatie (FAST en CT)*

Alle voorraaditems worden minstens vier maal per jaar geteld. Telverschillen worden geanalyseerd. Als daarbij een stuklijstafwijking wordt ontdekt wordt deze verbeterd.

Een maal per zes weken wordt een behoefteplanning gemaakt. Ook hier kunnen zich afwijkingen in de stuklijst manifesteren, bijvoorbeeld door tekorten in de productie. 70% van de gemelde tekorten is te wijten aan een stuklijstfout.

De afdeling Kostprijsbeheer controleert met een screeningsprogramma de stuklijsten. Indien een kostprijsafwijking niet kan worden verklaard door een wijziging, dan moet één van de lijsten fout zijn. De door Kostprijsbeheer gevonden afwijkingen worden geregistreerd en teruggekoppeld naar Man. Eng. en Prod. Coörd. .

Omdat de FAST de basis is waarop vele processen worden aangestuurd heeft er ook veel controle plaats. Geen van deze controles is echter te beschouwen als een structurele audit. De gevonden stuklijstafwijkingen zijn meer 'bijprodukten' van andere activiteiten.

De CT-en worden pas op juistheid getoetst met proeforders. Afwijkingen in de FAST en CT kunnen verkeerde produkten, produktiestops, annulaties, spoedorde en een verkeerde kostprijs tot gevolg hebben.

– *Produktinformatie (BT)*

De BT is de enige informatie die produktiemedewerkers ontvangen. Een fout in de BT heeft dan ook meestal een fout produkt tot gevolg. In de aanloopfase van grote projecten wordt soms een configuratie-check uitgevoerd. De werkelijke productie wordt dan vergeleken met de configuratie uit het informatiesysteem. Ook deze checks kunnen echter niet worden beschouwd als een standaard audit-activiteit.

– *Service-informatie*

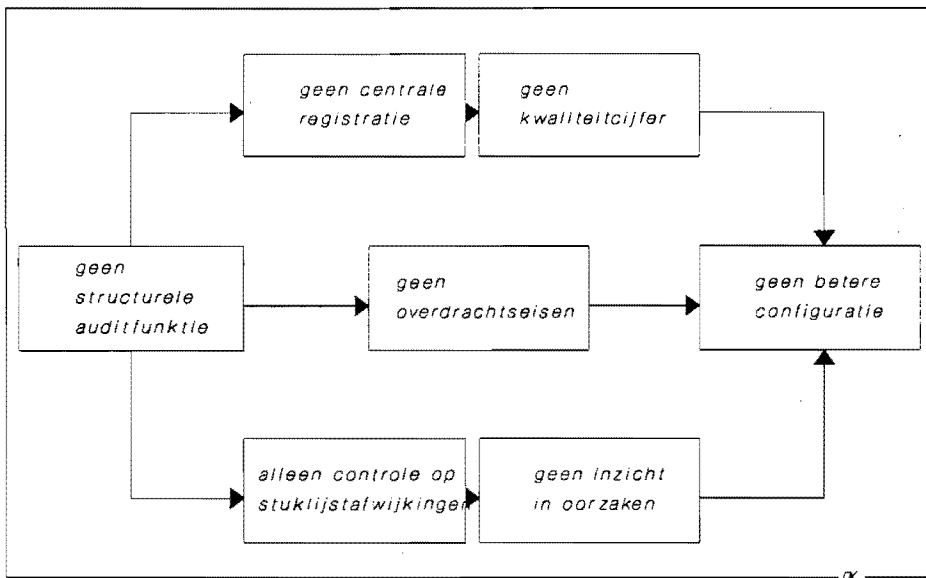
Service-onderdelen zouden moeten worden gedefinieerd op basis van de FAST. Door de onbetrouwbaarheid van de FAST gebeurt dit echter middels de KONSUL. Hierbij worden zowel fouten in de KONSUL als in de FAST ontdekt. De servicestuklijsten worden steekproefsgewijs gecontroleerd. Door de bestaande procedures wordt de tijdigheid van de informatie voldoende gegarandeerd.

5. Knelpunten in de huidige situatie

De huidige situatie is als volgt samen te vatten:

- Er bestaan geen structurele audit-activiteiten; de uitgevoerde controles worden verricht in het kader van andere activiteiten. Op managementniveau ontbreekt daardoor het overzicht.
- Afwijkingen worden verbeterd, maar de oorzaken worden niet achterhaald.
- Er zijn geen criteria vastgelegd waarin de kwaliteit van de configuratiegegevens kan worden uitgedrukt.
- Inkoop en Bevoorrading maken gebruik van de FAST. Fouten in deze stuklijsten zullen zich dan ook manifesteren in manco's en produktiestops. Veel afwijkingen worden ontdekt door Kostprijsbeheer en Service.
- Het is niet duidelijk welke overdrachtseisen de verschillen de gebruikers stellen aan de configuratiegegevens.

De genoemde problemen staan niet op zichzelf; de onderlinge afhankelijkheid is in figuur 3 weergegeven.



Figuur 3. Onderlinge afhankelijkheid van probleemgebieden

Het verdere onderzoek zal zich toespitsen op onder meer de genoemde probleemgebieden:

- *overdrachtseisen*
- *overzicht van gevonden afwijkingen*
- *audit-functie en audit-punten.*

Bij audit-punten moet worden gedacht aan de informatiegroepen zoals die in punt 4 (de huidige auditing van configuratiegegevens) zijn behandeld.

Het auditsysteem moet daarbij aan de volgende eisen voldoen:

- terugkoppelen van de configuratie-afwijkingen aan de betrokken afdelingen.
- registreren en analyseren van de waargenomen afwijkingen en het aangeven van verbeteringen in het beheersen van de configuratie
- periodiek genereren van een configuratie-kwaliteitscijfer.

6. Audit-methode voor stuklijst informatie

Wight¹, Mather² en Balcerak en Dale³ geven een aantal methoden, waarmee een audit op stuklijst-informatie kan worden uitgevoerd:

– *Analyse van een aantal stuklijsten*

Uit het stuklijstenbestand wordt een steekproef genomen. De geselecteerde stuklijsten worden gecontroleerd op volledigheid en juistheid van bepaalde belangrijke gegevens. De geanalyseerde stuklijsten worden gecorrigeerd, er ontstaat inzicht in de belangrijkste foutsoorten en er kan een kwaliteitscijfer worden berekend.

– *Analyse van materiaaluitgiften volgens de stuklijst*

De berekening van het brutobehoefteschema resulteert in afleverschema's van inkoopartikelen. Stuklijstafwijkingen kunnen verkeerde (aantallen) inkoopdelen genereren. Wanneer het afleverschema afwijkt van wat de bestseller op grond van zijn ervaring daarvan verwacht, volgt een nader onderzoek. Het doel is het signaleren van stuklijstafwijkingen voordat de bestellingen worden geplaatst. Naarmate het aantal varianten en opties stijgt wordt het lastiger om afwijkingen te signaleren.

– *Demontage van een produkt en vergelijken met de stuklijst*

Een produkt of samenstelling wordt gedemonteerd. Vervolgens worden de toegepaste materialen vergeleken met de stuklijst. Uit het aantal gevonden afwijkingen kan een kwaliteitscijfer worden bepaald. Bij ingewikkelde produkten is deze methode echter tijdrovend.

– *Analyse van telverschillen*

Bij het tellen van produkten worden verschillen gevonden tussen de werkelijke en de administratieve voorraad. Op deze wijze kunnen stuklijstfouten worden ontdekt.

– *Analyse van kostprijsverschillen*

Op basis van de stuklijst kan een kostprijs worden berekend. Wanneer er verschillen optreden met de verwachte kostprijs, kunnen stuklijstfouten de oorzaak zijn.

– *Uitvoeren van een aantal 'logische' controles*

Een controle kan bijvoorbeeld nodig zijn bij het veranderen van de registratie-eenheid; staal wordt ingekocht in tonnen en verbruikt in meters.

Uit hoofdstuk 4 blijkt dat een aantal van de genoemde methoden al min of meer worden toegepast. Een mogelijke verbetering zou dus zijn, het inpassen van de reeds toegepaste methoden in een centrale stuklijstfoutenregistratie. Elke gevonden afwijking dient te worden geregistreerd op een centraal punt. Van iedere afwijking moet de oorzaak worden achterhaald. Op deze wijze kan een overzicht worden verkregen. Een andere mogelijkheid is het uitvoeren van een configuratiecheck. Van een tevoren bepaald onderdeel van een auto worden de configuraties in de opeenvolgende fasen vergeleken met de gewenste configuratie. Door de afwijkingen te analyseren, verkrijgt men een indicatie van de situatie in de diverse configuratiestadia. Deze check kan als steekproef onafhankelijk van de bestaande organisatie worden uitgevoerd. Beide oplossingsrichtingen, de centrale stuklijstfoutenregistratie en de configuratiecheck, zullen in de volgende hoofdstukken verder worden uitgewerkt.

7. Stuklijstfouten registratie

– *Experiment centrale stuklijstfoutenregistratie*

Gedurende 12 weken is iedere gevonden stuklijstfout door de stuklijstgebruiker (foutmelder) geregistreerd. Van iedere gemelde stuklijstfout werden de volgende gegevens geregistreerd:

- foutmelder en datum
- KONSUL-fout of FAST-fout
- voertuigserie en produktnummer
- omschrijving en oorzaak van de fout.

De foutmeldingen werden verzameld op een centraal punt. Vervolgens werden voortgangsbesprekingen georganiseerd met de belangrijkste stuklijstgebruikers waarbij, na een gezamenlijke analyse, maatregelen ter verbetering werden voorgesteld. Op deze manier werd inzicht verkregen in het aantal stuklijsten en in de aard en oorzaak daarvan. De belangrijkste resultaten worden hieronder vermeld:

- gemiddeld is er één KONSUL-foutmelding per week
- gemiddeld zijn er vijftien FAST-foutmeldingen per week
- 70% van de foutmeldingen zijn voorraad-telverschillen
- 80% van de foutmeldingen heeft betrekking op de montagestuklijst van een bepaalde serie
- 20% van de foutmeldingen is niet terecht.

Gezien het geringe aantal foutmeldingen van de KONSUL beperken we ons hier tot de FAST. De foutmeldingen van de FAST zijn, opgesplitst in een aantal foutsoorten, weergegeven in tabel 1. Daarbij is in procenten aangegeven in welke mate de foutsoorten voorkomen en welke afdeling daarvoor verantwoordelijk is.

Tabel 1. Indeling van de foutsoorten

<i>Foutsoort</i>	<i>%</i>	<i>Verantwoordelijke afdelingen</i>
Stuklijstfouten:		
datum-schakeling	25	Prod. Coörd.
structuurinformatie	33	Man. Eng.
conversie-tabel	6	Prod. Coörd.

Niet-stuklijstfouten:		
adressering bouwgroep	2	Man. Eng.
procesinstructie	5	Man. Eng.
boodschaptabel	1	Prod. Coörd.

verkeerde toepassing in productie	5	Prod/Man. Eng.

Goederenbeheer/ onterechte melding	23	bevoorrading

Van het totaal aantal meldingen is dus slechts 64% een stuklijstfout. Daarvan zijn slechts twee foutsoorten van belang, de datumschakelingfouten en de structuurfouten.

– *Stuklijstfouten*

De stuklijstfouten uit tabel 1 zijn verder uitgesplitst in categorieën:

– *Datumschakelings-fouten*

- Bij een aangekondigde wijziging gaan Man. Eng. en Productie direct over op de nieuwe configuratie, terwijl Prod. Coörd. te laat wordt ingelicht.
- De FAST wordt te laat door Man. Eng. vrijgegeven om tijdig de wijziging te kunnen verwerken.
- De ingangsdatum van een wijziging wordt mede gebaseerd op onbetrouwbare voorraadgegevens van het te vervangen produkt.
- De datumschakeling wordt mede gebaseerd op de productieplanning. Als die verandert wordt de datum in de stuklijsten niet aangepast.
- Wijzigingen kunnen formeel slechts eens per dag ingaan;gedurende een dag lang kunnen dus verkeerde produkten worden afgeschreven.
- Leveranciers leveren niet de juiste configuratie op een bepaalde datum.

- *Structuurinformatiefouten*
- Het omzetten van een registratie-eenheid in een andere wordt vergeten of gebeurt verkeerd.
- Aantallen verschillen omdat de procesinstructie anders is dan de constructie voorschrijft.
- Een produkt wordt verkeerd opgevoerd in de stuklijst.

- *Conversiefouten*
- Een foute interpretatie en te globale specificatie van GMS of VB.
- Te laat leveren van conversiegegevens, waardoor de materiaalbehoefteplanning niet meer tijdig kan worden uitgevoerd.

Uit analyse van de gegevens bleek dat de belangrijkste foutsoorten in de datum-schakeling de voorraaddonbetrouwbaarheid en de planningsverschuivingen waren. In de structuurinformatie werden veel opvoerfouten gevonden. De meeste foutsoorten waren ontstaan door deelvrijgave. Dit houdt in dat eerst de belangrijkste produkten worden vrijgegeven; later volgt de vrijgave van de overige produkten. Veel 'onbelangrijke' produkten worden dan vergeten.

– *Betrouwbaarheid van het experiment*

De betrokken afdelingen namen vrijwillig aan het experiment deel. De indruk bestaat echter dat afdelingen de fouten slechts meldden als dat in hun voordeel was. Dit zou het lage aantal KONSUL-foutmeldingen en het hoge aantal foutmeldingen van de FAST verklaren. Het logistieke proces wordt namelijk aangestuurd op basis van de FAST en niet door de KONSUL. Het aantal foutmeldingen is ook afhankelijk van de tijd die de foutmeldende afdelingen aan de controle willen besteden.

Wat de voorraadverschillen betreft kan worden opgemerkt dat alleen de produkten met een 'voorraadbeleid' regelmatig werden geteld en dat alleen grote verschillen werden geanalyseerd.

De resultaten van het experiment moeten dus met enige voorzichtigheid worden gehanteerd.

8. Configuratiecheck

De configuratiecheck wordt uitgevoerd door van een bepaald onderdeel van een voertuig op een bepaalde datum afdrukken te maken van de volgende bestanden: VB, HIS, KONSUL, FAST en PSL. De beschreven configuraties worden vergeleken met de gewenste configuratie. De afwijkingen worden ingedeeld in foutsoort en foutoorzaak.

Bij wijze van proef is een configuratiecheck uitgevoerd op de brandstofinstallatie

van een bepaald type. Tabel 2 geeft een overzicht van de afwijkingen die gevonden zijn.

De gevonden afwijkingen betroffen:

- KONSUL: fouten die bij de verwerking van de tekening in de stuklijst ontstaan door slordigheid
- FAST en PSL: ten onrechte opgevoerde vergeten bevestigingsmiddelen en dergelijke door het onvolledig verwerken van wijzigingen.

Tabel 2. Configuratie afwijkingen

<i>Configuratie afwijkingen</i>	<i>Aantal afwijkingen</i>
VB	0
HIS	0
KONSUL	3
FAST	6
PSL	6

Overigens bleken verkeerde specificaties weinig invloed te hebben op de gebouwde configuratie. Vervolgens zijn de diverse configuraties onderling vergeleken.

Tabel 3 geeft een overzicht van de afwijkingen die zijn gevonden.

Tabel 3. Afwijkingen tussen de diverse configuraties

<i>Configuratie afwijkingen</i>	<i>Aantal afwijkingen</i>
KONSUL-FAST	4
FAST-PSL	29
PSL-productie	11

De gevonden afwijkingen zijn:

- KONSUL-FAST
verkeerde aantallen in KONSUL, door het slordig verwerken van tekeningen
- FAST-PSL
verschillende benamingen voor dezelfde producten en verkeerd overgenomen KONSUL-gegevens
- PSL-Productie
kleine bevestigingsmiddelen door het onvolledig verwerken van wijzigingen.

Ook bij het experiment 'Configuratiecheck' moeten enige kanttekeningen worden gemaakt:

- Een configuratiecheck heeft een steekproefsgewijs karakter. De constructie-eenheid geniet daarbij de voorkeur als uitgangspunt.
- In ieder auditpunt kan de configuratie los van de overige configuratiestadia worden getoetst.

- Het vergelijken van de verschillende produktconfiguraties vereist veel produktkennis.
- Een check op de gebouwde configuratie wordt van wezenlijk belang geacht omdat het hier fouten betreft die gerealiseerd zijn.
- Bij de check op de gebouwde configuratie moet rekening worden gehouden met waarnemingsfouten door de hoge montagesnelheid.
- De tijd nodig voor het uitvoeren van de configuratiecheck was 36 man-uren.

In tegenstelling tot de centrale stuklijstfoutenregistratie kan een configuratiecheck dus wel op een objectieve wijze informatie verschaffen over de kwaliteit van de stuklijsten. Hoe omvangrijk een configuratiecheck moet zijn is afhankelijk van het gestelde doel. Ligt de nadruk op het verkrijgen van inzicht dan kan worden volstaan met een steekproef.

9. Het kwaliteitscijfer voor de fabricagestuklijst

Aangezien er te weinig informatie beschikbaar is over KONSULfouten beperken we ons hier tot de ontwikkeling van een kwaliteitscijfer voor de FAST. Stuklijstfoutenregistratie en configuratiecheck zouden beiden het cijfermateriaal kunnen leveren voor de berekening van het kwaliteitscijfer.

Bij de stuklijstfoutenregistratie zijn de resultaten echter niet geheel representatief voor de werkelijkheid. Bij de configuratiecheck daarentegen wordt het gevonden percentage afwijkingen veel minder beïnvloed door omgevingsfactoren.

Bij het ontwikkelen van een kwaliteitscijfer zal derhalve worden uitgegaan van een steekproefsgewijze configuratiecheck. Dit wordt ook door de meeste auteurs aanbevolen.

Edson⁵ definieert daarbij ‘BOM-accuracy’ als:

‘the percentage of items on the parts master file whose billof-material on the system file is in agreement with the way the item is built. The measurement should be made on a singlelevel basis. The characteristics that should be checked are part numbers, quantity per, correct components, missing components and duplications’.

Omdat in het experiment in de FAST structuur en datumfouten het meest voorkwamen, moet een audit zich dan ook richten op de volgende stuklijstgegevens:

- produktnummer
- aantal en registratie-eenheid
- ingangs- en uitgangsdatum

De vraag rijst of er een onderscheid dient te worden gemaakt naar de verschillende soorten stuklijstfouten. Bepaalde stuklijstfouten kunnen de oorzaak zijn van

voorraadoverschotten, tekorten, hermontage, kostprijverschillen etc. Daarentegen kunnen de gevolgen van dezelfde stuklijstfout op een verschillend moment ook totaal verschillen, afhankelijk van bijvoorbeeld voorraadhoogte, verbruik, uitwisselbaarheid en levertijd. Daarom zal bij de bepaling van het audit-cijfer dan ook niet worden uitgegaan van een classificatie van stuklijstfouten.

Het kwaliteitscijfer kan op een aantal manieren worden bepaald, namelijk op basis van:

- meerlaagse structuren (van componenten tot monodelen)
- eenlaagse structuren (alleen het item en de direkt daaronder liggende onderdelen)
- relatieregels

Bovenstaande mogelijkheden moeten worden getoetst aan de steekproefkosten, de nauwkeurigheid van het resultaat en de gevoeligheid van het kwaliteitscijfer. Ook de mate waarin de eenheid van informatie duidelijk te meten is, speelt een rol.

Een kwaliteitscijfer gebaseerd op meerlaagse structuren is een zeer onnauwkeurige maat; het voorkomen van meerdere fouten per structuur enerzijds en anderzijds het dubbeltellen van fouten wordt niet tot uitdrukking gebracht. Bij de vergelijking van de twee andere mogelijkheden blijkt dat alleen op samenstellingsniveau kan worden bepaald of een relatieregel terecht is opgevoerd. Bij de selectie van een relatieregel dient dus toch altijd de volledige samenstelling te worden geanalyseerd. Er is dus geen verschil in tijdsbesteding tussen beide methodes. Een relatieregel is echter een meer nauwkeurige informatieeenheid dan de eenlaagse structuur; een eenlaagse structuur kan namelijk meerdere niet-correcte relatieregels bevatten. Deze nauwkeurigheid leidt echter tevens tot een ongewenst hoge gevoeligheid. Het kwaliteitscijfer (KC) kan dus het beste worden gedefinieerd op basis van eenlaagse structuren. Dit standpunt wordt gedeeld door Balcerak³, Frank⁶ en Erhorn⁷; zie figuur hieronder.

$$KC = \frac{\text{het gevonden aantal correcte eenlaagse structuren}}{\text{het totale aantal gecontroleerde eenlaagse structuren}}$$

Uit het experiment bleek dat, statistisch gezien, met een steekproef van 150 à 200 eenlaagse structuren kan worden volstaan. Tevens kon worden vastgesteld dat het uitvoeren van een configuratiecheck voor 150 samenstellingen ongeveer 150 manuren kost.

10. Een audit-systeem voor de fabricagestuklijst

– *Centrale stuklijstfoutenregistratie*

Na vrijgave van de fabricagestuklijst zullen de stuklijstgebruikers foutmeldingen genereren, die moeten worden geregistreerd en geanalyseerd door de verantwoordelijke afdelingen: Prod. Coörd. en Man. Eng.

De volgende gegevens dienen te worden geregistreerd:

- foutmelder (afdeling) en datum
- voertuigserie en produktnummer
- foutsoort en plaats
- afdeling waar de fout ontstaan is.

EVBenmaal per maand moet voor iedere voertuigserie een auditbespreking worden georganiseerd waarin vertegenwoordigers van Prod. Coörd., Eng. Man. en Ontwikkeling deelnemen. Het registreren en analyseren van de foutmeldingen is slechts een uitbreiding van al bestaande activiteiten. De centrale stuklijstfoutenregistratie kan dus snel worden ingevoerd.

Voor de extra activiteiten die moeten worden uitgevoerd (het zoeken naar foutoorzaak in de auditvergadering), is de tijdsbesteding per voertuigserie geschat op twaalf manuur per maand.

Een hoge kwaliteit van de FAST zal invloed hebben op de kwaliteit van het voertuig en op de logistieke resultaten. Betere stuklijsten leiden tot minder foutmeldingen, zodat de audit op den duur minder tijd zal gaan kosten. Met beperkte inspanning kunnen dus in het kader van 'problem solving' op korte termijn voordelen worden behaald. Bovendien zijn er bij de invoering weinig problemen te verwachten.

– *Configuratiecheck*

Van een bepaalde constructie-eenheid van een voertuig worden op bepaalde data de volgende configuraties vergeleken met de gewenste configuratie:

- Variant Binder (VB)
- Hoofdindeling Stuklijsten (HIS)
- Constructiestuklijst (KONSUL)
- Fabricagestuklijst (FAST)
- Produktiestuklijst (PSL).

De configuratiecheck heeft een steekproefsgewijs karakter; de gevonden afwijkingen worden geanalyseerd. In auditbesprekingen kan verder aan het oplossen van de problemen worden gewerkt. Parallel aan deze probleemoplossende activiteiten moet echter aandacht worden besteed aan het creëren van kwaliteitscijfers. Uit de gegevens van de configuratietechniek moet daarom op basis van eenlaagse

structuren een KC worden berekend. Voor een betrouwbaar KC moeten 150 eenlaagse structuren worden berekend. Het uitvoeren van een configuratiecheck vereist veel produktkennis en kost, vooral in het begin, veel tijd. Een volledige configuratiecheck kost ongeveer één uur per fabricagesamenstelling; het deelnemen aan voortgangsbesprekingen ongeveer drie manuur per twee maanden. Voor een configuratiecheck moet structureel capaciteit worden vrijgemaakt.

– *Audit-punten*

Het onderzoek is tot nu toe vooral gericht op de inhoud van de FAST. Met betrekking tot de andere audit-punten kan het volgen de gezegd worden:

– *Marketing-informatie (VB)*

een configuratiecheck is niet zo geschikt om een audit opmarketing-informatie uit te voeren.

– *Ontwikkelingsinformatie*

voor de KONSUL en HIS kan hetzelfde audit-systeem worden opgezet als voor de FAST. Zij hebben echter geen logistieke functie de noodzaak tot het melden van fouten heeft vaak geen hoge prioriteit.

11. Conclusies en aanbevelingen

Configuratiebeheer is een onderwerp waar vele bedrijfsfuncties van afhankelijk zijn. Door de ‘tegenstrijdige belangen’ zijn tot nu toe weinig resultaten geboekt. Alle uitspraken over configuratiebeheer zijn voornamelijk van kwalitatieve aard. Door een cijfermatige ondersteuning kan beter zichtbaar worden gemaakt wat de huidige kwaliteit van de configuratie is en welke normen nagestreeft moeten worden. Voor het realiseren van configuratiebeheer moet capaciteit worden vrijgemaakt in de vorm van eigen medewerkers.

Er zijn een aantal punten in het configuratietraject bepaald waar een audit-systeem moet worden ingevoerd: VB, KONSUL + HIS, FAST (ME) + AB en FAST (PC) + CT + BT.

Het audit-systeem zoals dat is ontwikkeld omvat drie gebieden:

- het genereren van kwaliteitsgegevens
- het bepalen van een kwaliteitscijfer
- probleem-oplossende activiteiten.

Het genereren van gegevens wordt op twee manieren uitgevoerd:

- een centrale stuklijstfoutenregistratie
- een configuratiecheck.

Ten aanzien van het audit-systeem dat voor FAST ontwikkeld is, geldt het volgende:

- de centrale stuklijstfoutenregistratie moet, per voertuigserie, zo spoedig mogelijk worden ingevoerd. Op korte termijn kunnen goede resultaten worden bereikt.
- daarna dient de configuratiecheck te worden ingevoerd. Een introductie is nodig. Een volledige configuratiecheck omvat 150 fabricage-samenstellingen. Hieruit wordt het kwaliteitscijfer gegenereerd.
- voor de andere geselecteerde auditpunten moet op langere termijn een audit-systeem worden ontwikkeld.

Literatuur

1. Wight, O. , *Bills of Material Course*, 1986.
2. Mather, H. , *Bills of Material (Recipes and Formulations)*, 1982.
3. Balcerak, K. J. , and Dale, B. G. , *Measuring Bill of Material Accuracy: Practicalities and Pitfalls*, Elsevier, 1987.
4. Guess, V. , *How to measure Bill of Material Accuracy*, APICS Conference Proceedings, 1985.
5. Edson, N. W. , *Measuring MRP System effectiveness*, APICS Conference Proceedings, 1981.
6. Frank, D. N. , *How to really create and maintain accurate bills of material*, APICS Conference Proceedings, 1986.
7. Erhorn, C. R. , *How to audit your MRP System for consistent results*, APICS Conference Proceedings, 1987.
8. Vogelaar, K. , *Konfiguratiebeheer, eerst meten!*, Technische Universiteit Eindhoven, Bedrijfskunde, februari 1989.

Het afstudeerrapport van K Vogelaar verscheen reeds eerder, herschreven door M. Igel, in Doelmatige Bedrijfsvoering, Jrg. 1 Nr. 7/8, juli/augustus 1989

Het beheersen van kritische delen in de materiaalverwerving

19

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. H.D. Terhenne en samengevat en bewerkt door M. Igel

Inleiding

Een fabrikant van algemeen inzetbare produktiemachines binnen de EEG ontwikkelt, fabriceert en verkoopt een aantal basistypen in verschillende uitvoeringen. Produktie en assemblage hebben plaats in diverse vestigingen. Jaarlijks worden 40.000 machines afgezet. Eind 1988 waren bij het bedrijf ongeveer 8.000 werknemers in dienst.

Men produceert op klantenorder. De levertijd voor standaardmachines is 8 weken; de assemblageplanning wordt voor vijf weken vastgelegd.

Het op order assembleren heeft tot gevolg dat de materiaalverwerving op basis van prognose moet gebeuren.

In de praktijk blijkt echter dat de prognose vaak niet overeen komen met de klantenorders die later worden ontvangen. Hierdoor kan het gebeuren dat de verkeerde onderdelen zijn besteld.

Om ervoor te zorgen dat alleen orders worden geaccepteerd waar voor de benodigde materialen beschikbaar zijn, dient direct bij de orderacceptatie de materiaalbeschikbaarheid te worden gecontroleerd.

Door het grote aantal is het niet mogelijk alle onderdelen op beschikbaarheid te controleren. De onderdelen die in ieder geval wél moeten worden gecontroleerd noemt men *kritische onderdelen*.

Wat precies de kritische onderdelen zijn, is niet vastgelegd.

Dit had tot gevolg dat onderdelen om zeer uiteenlopende redenen door de materiaalplanners *kritisch* zijn gemaakt. Om dezelfde reden is het niet mogelijk het kritische delenbestand regelmatig te schonen.

Dit probleem was aanleiding tot een onderzoeksopdracht, bestaande uit drie delen:

- analyseer het kritische delenbestand
- onderzoek de aspecten die aanleiding geven tot het 'kritisch zijn'

– definieer het begrip 'kritische delen'.

Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd bij de afdeling, die tot taak heeft, het materiaalverwervingsproces te beheersen.

1. Stuklijstniveaus

Op basis van de modulaire opbouw van de machines is men in staat een zeer groot aantal verschillende uitvoeringen te bouwen. De flexibiliteit waarmee een kwalitatief hoogstaand produkt wordt geleverd, is een van de sterke punten van het bedrijf.

Voorwaarde voor een modulaire opbouw is dat het produkt bestaat uit componenten die met elkaar zijn te combineren zonder dat daarbij al te veel beperkingen gelden.

In de stuklijst onderscheidt men daarom een aantal niveaus:

Basistype

Het basistype is het hoogste niveau in de stuklijst. Per basis type is de Basis Specificatie vastgelegd, waarbinnen het mogelijk is te kiezen tussen verschillende uitvoeringen.

Componentengroepen

Ieder basistype bestaat uit een aantal componenten. Er zijn 500 groepen van componenten. Binnen een basistype kunnen ook bepaalde combinaties van componenten zijn uitgesloten. Anderzijds zijn bepaalde combinaties voorgeschreven.

Voorraadonderdelen

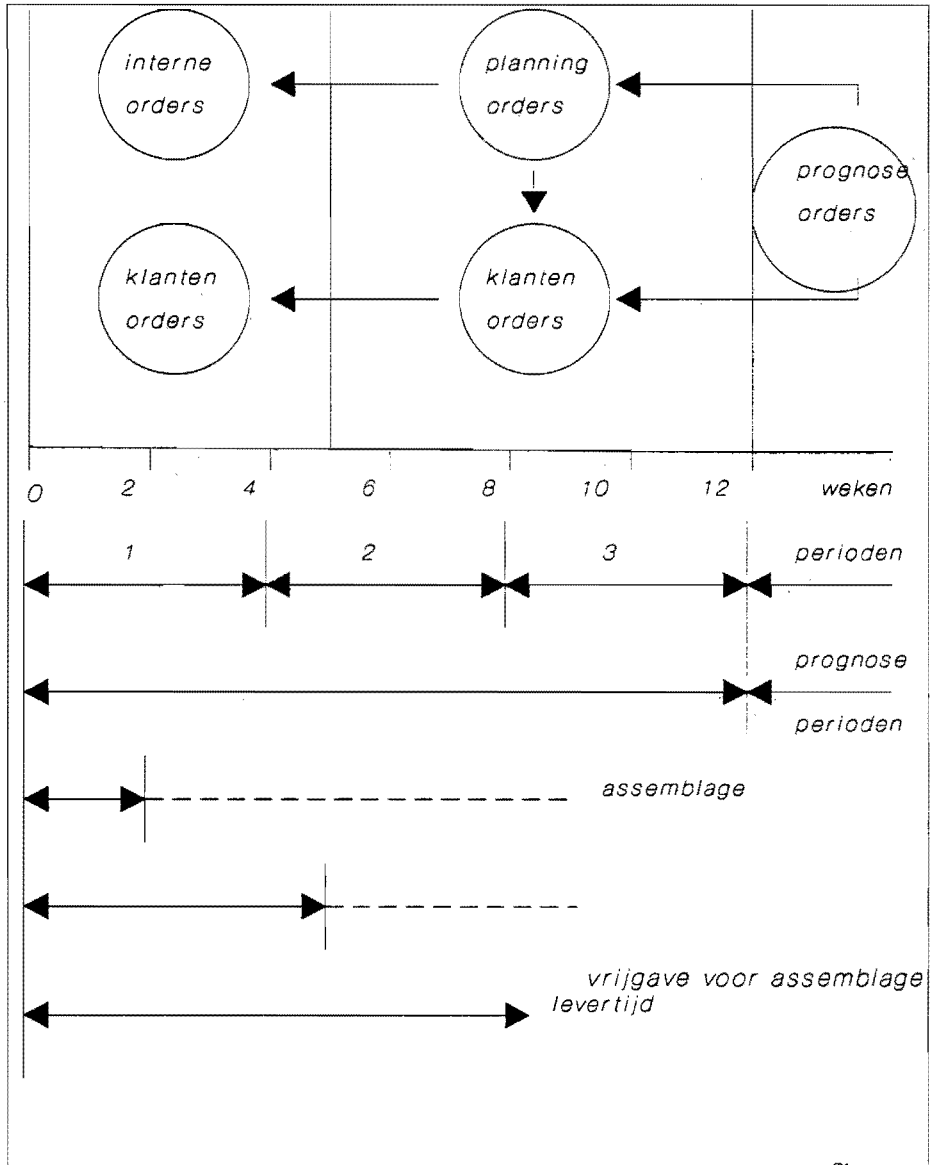
Componenten zijn opgebouwd uit zogenaamde voorraadonderdelen. Dit zijn montagerijpe onderdelen. Voorraadonderdelen worden ingekocht en liggen op voorraad. Boven dit niveau wordt uitsluitend op order gewerkt.

2. Materiaalbehoeftebepaling

Verkoop levert ieder kwartaal een verkoopprognose. Aan de hand hiervan wordt de behoefte aan voorraadonderdelen bepaald.

Het orderbestand bestaat uit drie *vaste* perioden van vier weken, voorafgegaan door prognoseperioden.

De vaste perioden geven aan wat er de komende perioden daadwerkelijk gaat worden geassembleerd. De prognose-perioden worden gebruikt om de behoefte aan voorraadonderdelen te bepalen.



Figuur 1. Opbouw van het orderbestand

In de vaste perioden worden drie soorten orders onderscheiden:

- klantenorders
- *interne orders* zijnde voor assemblage vrijgegeven orders die op voorraad worden geproduceerd, en
- *planningorders*, zijnde wel volledig gespecificeerde orders die echter nog niet zijn vrijgegeven voor assemblage.

Vijf weken voor aflevering, worden klanten- en planningorders voor productie vrijgegeven; de planningorders worden daartoe omgezet in interne orders. Klanten en interne orders die zijn vrijgegeven voor productie kunnen niet meer worden gewijzigd. Na de derde periode is het orderbestand gevuld met uitsluitend geprognoseerde orders. De omzetting van prognoseorders naar klantenorders en planningorders heeft plaats aan het eind van iedere periode.

Als een nieuwe klantenorder wordt ontvangen, wordt een vergelijkbare planningorder omgezet in de klantenorder.

Figuur 1 geeft het bovenstaande weer.

In de eerste drie perioden is de behoefte aan voorraadonderdelen eenduidig toe te wijzen aan de orders waaruit deze behoefte is berekend.

Bij wijziging van een order wijzigt ook de behoefte op het niveau van voorraadonderdelen. Voor de overige perioden is de relatie tussen de planning en de prognose-orders niet meer aanwezig.

3. Wijziging van de geplande materiaalbehoefte

Binnen de *Vaste Behoefte Termijn* (VBT) kunnen gebruikers binnen het bedrijf niet zonder meer extra behoefte opvoeren. De VBT bestaat uit de inkooplevetijd plus de tijd nodig voor de administratieve afhandeling.

Valt een behoeftewijziging buiten de VBT dan is er geen probleem; het systeem zal de gewijzigde behoefte zonder meer opnemen.

Ook in geval dat een klantenorder binnen de VBT wordt ontvangen, maar identiek blijkt te zijn aan een planningorder in het bestand, kan de klantenorder in plaats van de order worden ingevoerd.

Wil de klant echter een machine, die niet in de gewenste specificatie als planningorder in het bestand aanwezig is, dan kan dit grote wijzigingen met zich meebrengen in de materiaalbehoefte. Er wordt dan een planning-order uitgezocht die veel lijkt op de klanten-order.

Vervolgens wordt in verband met de resterende verschillen een controle uitgevoerd op de materiaalbeschikbaarheid.

Een materiaalbeschikbaarheidscontrole van alle voorraadonderdelen betekent echter dat per orderwijzigingsverzoek ongeveer 3.000 delen moeten worden gecontroleerd.

Aangezien dit niet haalbaar is wordt uit de te controleren onderdelen een keuze gemaakt. De materiaalplanner bepaalt welke onderdelen zo *kritisch* zijn, dat een controle altijd gerechtvaardigd is. Deze afweging wordt gemaakt op basis van ervaring. De te controleren onderdelen zijn nu de 'kritische onderdelen waarover eerder werd gesproken.

Bij een orderwijzigingsverzoek wordt door een computerprogramma een lijst opgesteld van verschillen, tussen de uit het bestand af te voeren planningorder en de op te voeren klantenorder. Op deze lijst worden de kritische onderdelen vermeld, waarvan er in de klantenorder meer nodig zijn dan in de planningorder. Deze delen worden vervolgens gecontroleerd op beschikbaarheid en gesignaaleerd, indien de voorraad binnen de VBT komt onder een veiligheidsgrens.

Een belangrijk verschil tussen kritische en niet-kritische delen is dus, dat de kritische delen direct bij de orderacceptatie worden gecontroleerd op beschikbaarheid, en de niet-kritische delen op een later tijdstip.

4. Analyse van het kritische-delenbestand

– Enquête

Om een beeld te krijgen van wat kritische delen zijn, werd een aantal materiaalplanners geënquêteerd.

Deze materiaalplanners noemen in de enquête een aantal redenen waarom delen kritisch zijn:

- lage jaarplanning
- hoge prijs
- lange levertijd
- onbetrouwbare planning
- problemen die zich hebben voorgedaan in het verleden
- geen na-montage mogelijk.

De antwoorden bleken afhankelijk te zijn van het pakket onderdelen dat een materiaalplanner beheerde. Ook bleek dat materiaalplanners bepaalde onderdelen om onderling zeer uiteenlopende redenen kritisch maken.

De resultaten van de enquête zijn de aanzet geweest tot een gerichte analyse van de inhoud van de database, waarin de kritieke onderdelen zijn opgenomen.

– Database analyse

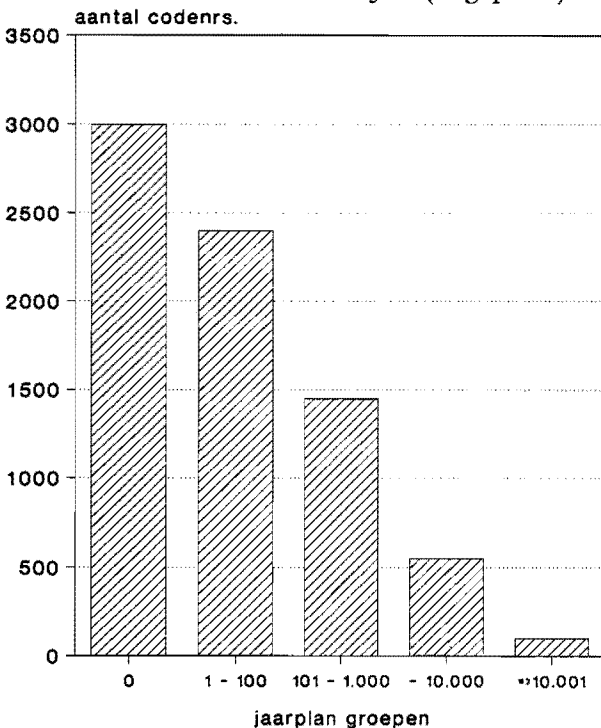
De analyse van het databestand van kritische delen is uitgevoerd om de genoemde kenmerken te kwantificeren.

Daartoe zijn allereerst de in het bestand aanwezige onderdelen ingedeeld in afname-categorieën.

Figuur 2 geeft een beeld van het aantal onderdelen per jaarplanning-groep (geplande behoefte over het komende jaar) dat in het bestaande kritische onderdelenbestand werd aangetroffen

De jaarplanning van onderdelen liep uiteen, van nul tot meer dan 100.000 stuks

per jaar; 90% van het kritische onderdelenbestand had echter een jaarplanning van minder dan 1.000 stuks en bijna de helft van het bestand had geen geplande behoefte binnen het komende jaar (ongepland).



Figuur 2. Opbouw van het kritische onderdelen bestand volgens jaarplanning categorieën

Uit het onderzoek bleek ook dat de verhouding tussen de verschillende groepen in het bestand zeer constant was, ondanks een sterke groei in het afgelopen half jaar.

Onderdelen met een lage jaarplanning worden kritisch geacht omdat al bij kleine verhogingen van de planning voorraadtekorten ontstonden, vooral bij dure delen waarvan weinig voorraad wordt aangehouden.

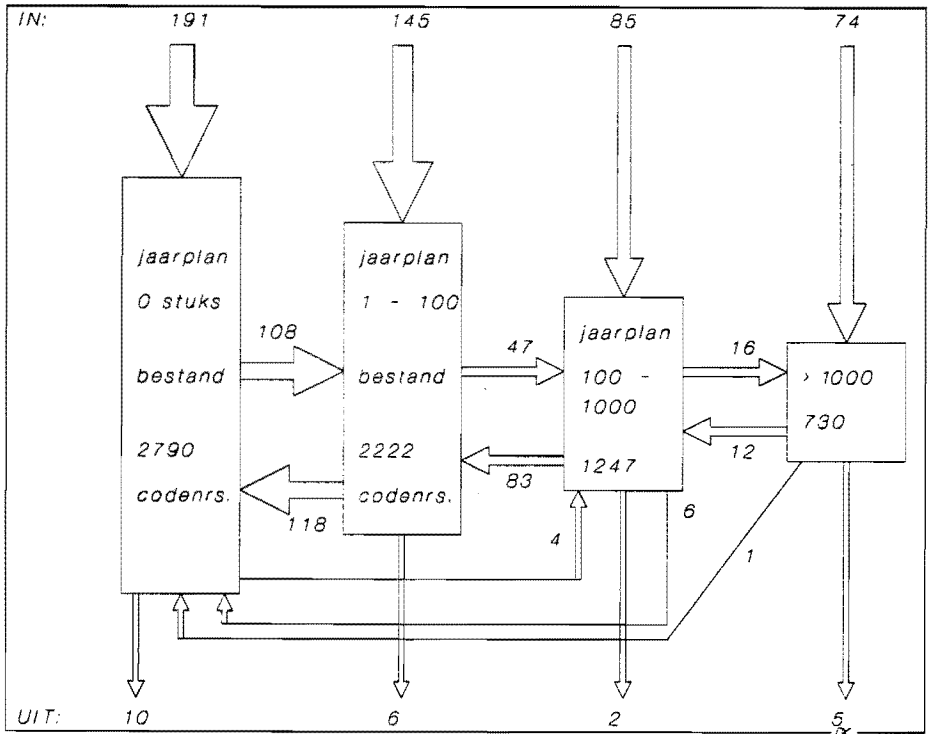
Een 'laag' jaarplan betekende echter nog niet direct dat een onderdeel kritiek was. Zo betekende bijvoorbeeld 2.000 stuks per jaar voor een duur gietstuk iets heel anders dan voor een bevestigingsbout. Ondanks het lage jaarplan was de bevestigingsbout toch niet kritisch, omdat de prijs ervan laag was. Het gietstuk was daarentegen wel kritisch omdat dit veel meer kostte.

Nog een punt dat meespeelde was de stabiliteit van de jaarplanning: deed de vraag zich gespreid over een heel jaar voor, of had de afname in twee of drie keer plaats. Het bleek dat naarmate een jaarplanning lager werd, over het algemeen ook de stabiliteit van de jaarplanning afnam.

Per onderdeel is verder bekeken of de jaarplanning in de vorige periode verschilde met die in de geanalyseerde periode.

Figuur 3 laat de verschillende groepen uit het kritische onderdelen bestand zien, en de verschuivingen die daartussen plaats hadden.

De dikte van de pijlen geeft aan hoeveel onderdelen bij de periodewisseling naar een groep met een andere jaarplanning gingen. De grootte van de blokken komt overeen met het aantal onderdelen in de desbetreffende groep.



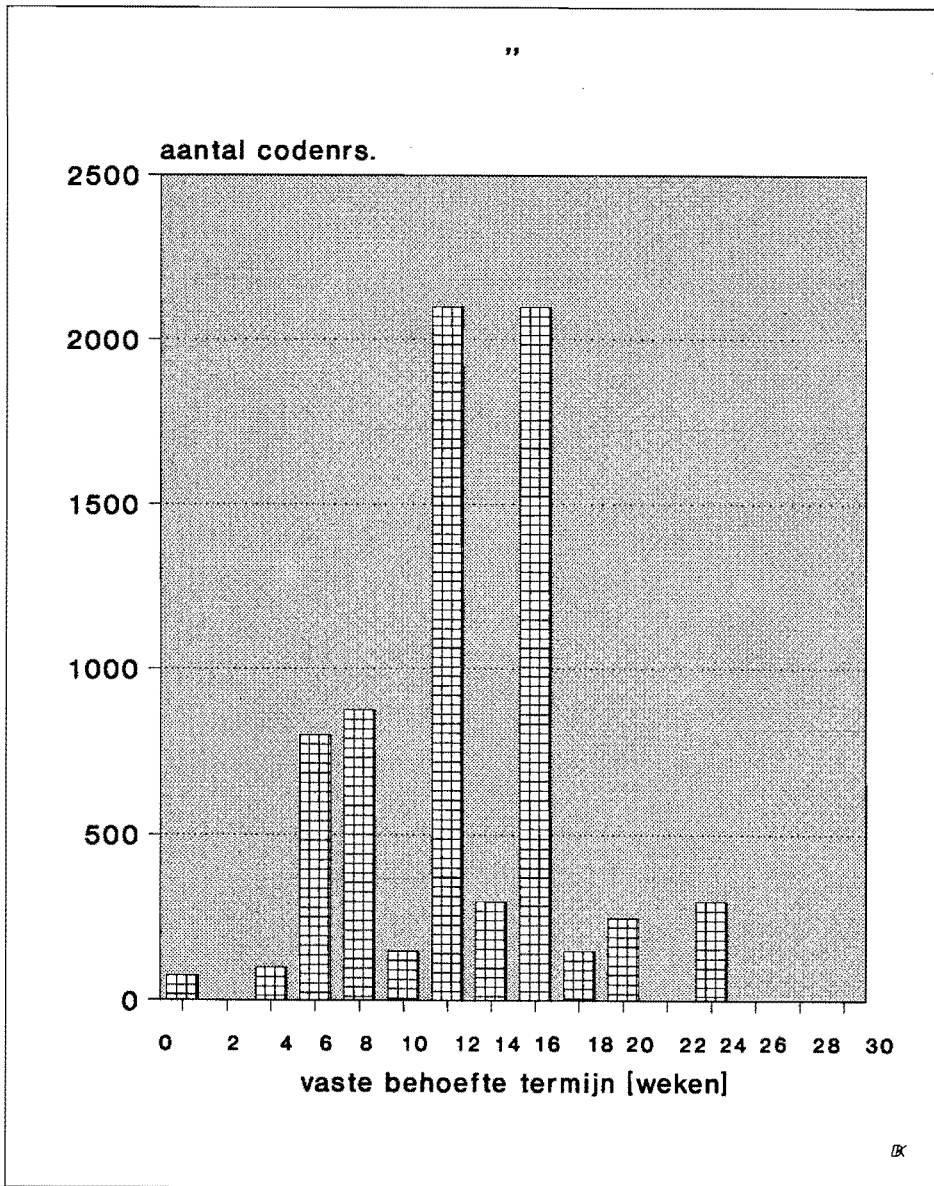
Figuur 3. Overgangen tussen jaarplan categorieën

Over het algemeen verschoven de onderdelen als gevolg van een wijziging van de jaarplanning niet meer dan één groep omhoog of omlaag. Uit figuur 3 blijkt dat per periode 2% à 9% van de onderdelen van een jaarplan-groep doorstroomde naar een andere groep.

Wat vooral opvalt is dat aan het bestand wel iedere periode ongeveer 500 onderdelen werden toegevoegd, maar dat er vrijwel geen onderdelen uit werden verwijderd. Tijdens een halfjaarlijkse actie, waarbij incurante voorraadonderdelen worden afgevoerd, werd tevens een groot deel van de nul-geplande onderdelen uit het kritieke onderdelenbestand verwijderd.

Voor ongeplande delen gold dat zij potentieel incurant waren; over het algemeen werden zij dus niet op voorraad gehouden. Als een ongepland onderdeel werd gevraagd dan moest dit dus direct worden gesignaleerd, tenzij de levertijd korter was dan twee weken.

De assemblage start namelijk twee weken voor het aflevertijdstip. Voor 1-100 geplande onderdelen gold dat extra vraag al snel leidde tot voorraadtekorten, omdat de veiligheidsvoorraad niet toereikend was. Signalering van deze onderdelen was dus eveneens gewenst tenzij de levertijd korter was dan twee weken, of indien het om goedkope onderdelen ging (er is dan extra veiligheidsvoorraad). Laaggeplande onderdelen zijn echter vaak duur; daarom werd van deze delen meestal weinig voorraad gehouden.

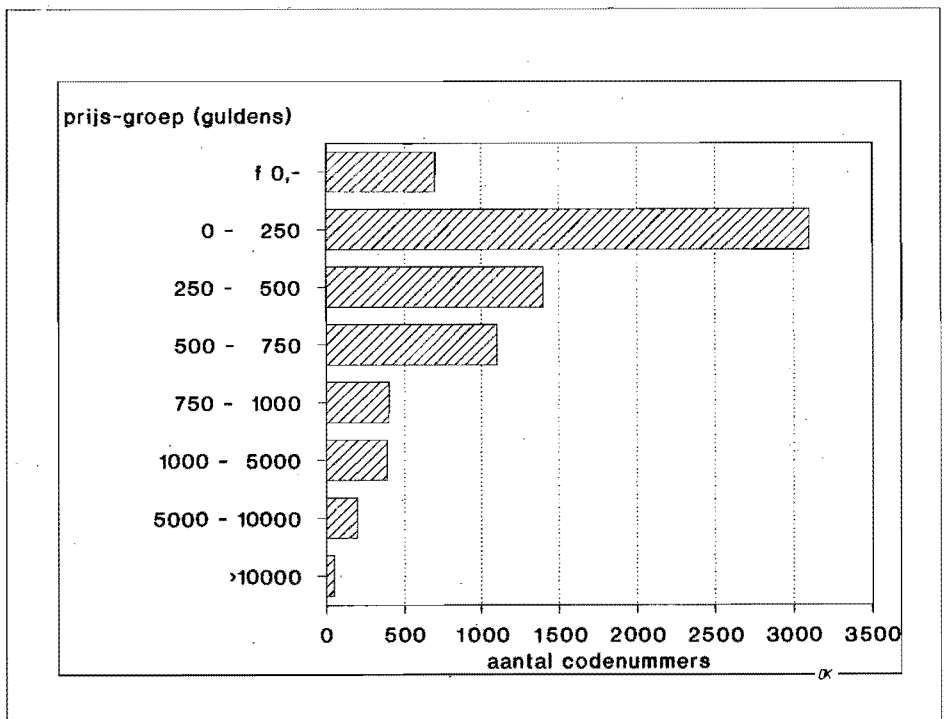


Figuur 4. Kritische onderdelen per vaste behoefte termijn (VBT) categorie

De *vaste behoefte termijn (VBT)* was van alle onderdelen bekend. In figuur 4 is het aantal onderdelen per VBT-categorie aangegeven zoals dat uit de analyse van het kritische onderdelenbestand naar voren kwam.

Het assemblageproces wordt steeds voor de komende vijf weken vastgelegd. De assemblage start vervolgens twee weken voor het aflevermoment (zie figuur 1). Hieruit volgt dat onderdelen die binnen twee weken verworven kunnen worden niet kritiek zijn.

De *kostprijs* van de onderdelen in het kritische onderdelenbestand varieerden uiteraard sterk. Van 10% van de onderdelen in het bestand was nog geen prijs bekend; 45% van de onderdelen kostte minder dan 250 gulden; 50% van deze groep delen had een jaarplanning van minder dan 100 en slechts 20% had een jaarplanning die groter was dan 1000. 45% van de onderdelen kostte meer dan 250 gulden; 85% van deze groep had een jaarplanning van minder dan 100 stuks. Figuur 5 toont de verdeling in prijsgroepen.



Figuur 5. Het aantal kritische onderdelen per prijsgroep

– Gesprekken met materiaalplanners

Uit de analyse bleek dat veel kritische onderdelen een zeer lage jaarplanning (minder dan 100) hadden en gevoelig waren voor planningswijzigingen omdat deze niet konden worden opgevangen met behulp van de veiligheidsvoorraden.

Bovendien was dan ook de stabiliteit van de planning vaak gering. Voor onderdelen met een zeer lage jaarplanning stond dus vast waarom deze kritisch waren; minder duidelijk lag de situatie bij kritische onderdelen met een jaarplanning van meer dan 100.

Om meer informatie over deze groep onderdelen te verkrijgen zijn gesprekken gevoerd met materiaalplanners. Uit deze gesprekken kwam naar voren dat er een aantal groepen onderdelen waren die elk om een specifieke reden in zijn geheel kritiek wordt geacht.

Onderdelen uit de aldus te onderscheiden acht groepen van onderdelen waren *kritisch*, omdat ze aan de volgende combinaties van kenmerken voldeden:

- duur en lange VBT
- duur en optie-afhankelijk
- lange VBT en optie-afhankelijk.

Daarnaast waren er onderdelen die duidelijk ten onrechte in het kritische onderdelen-bestand voorkwamen, omdat die onderdelen waren overgenomen van andere materiaalplanners zonder dat de nieuwe materiaalplanner kon aangeven waarom ze kritiek waren. Het ging in deze gesprekken alleen om onderdelen met een jaarplanning groter dan honderd.

5. Conclusies

Samenvattend kan over kritische onderdelen het volgende worden gezegd:

- nul-geplande onderdelen zijn altijd kritisch omdat er geen vraag wordt verwacht en er bijna geen voorraad wordt gehouden.
- zeer laaggeplande onderdelen (1-100) zijn kritisch, tenzij de levertijd erg kort is of indien het om goedkope onderdelen gaat (meer voorraad).
- de meeste kritische onderdelen hebben een jaarplanning van minder dan 1.000 stuks.
- 85 % van de kritische onderdelen die meer dan f 250, kosten, hebben een jaarplanning van minder dan 100 stuks; 10% van de kritische onderdelen is nog nooit besteld.
- kritische onderdelen hebben een VBT van meer dan twaalf weken.
- onderdelen met een VBT kleiner dan twaalf weken zijn alleen kritisch als ze optie-afhankelijk zijn of als ze erg duur zijn
- onderdelen met een jaarplanning van meer dan honderd stuks zijn alleen kritisch indien deze onderdelen:
 - meer dan f 250, - kosten en de VBT meer dan zes weken is
 - meer dan f 250, - kosten en erg optie-afhankelijk zijn
 - minder dan f 250, - kosten, een VBT van meer dan twaalf weken hebben en optie-afhankelijk zijn.

Dit geldt met name voor onderdelen uit de in gesprekken met materiaalplanners genoemde groepen; deze delen kosten veelal meer dan $f\ 250,-$.

- de omvang van het bestand neemt toe, de opbouw is echter constant.
- één groep onderdelen blijkt ten onrechte in het kritische onderdelenbestand voor te komen, namelijk de overgenomen posten.

Uit het bovenstaande valt op te maken dat er vier kenmerken zijn op basis waarvan bepaald wordt of een onderdeel kritisch is:

- hoge prijs
- lange VBT
- lage jaarplanning
- grote optie-afhankelijkheid.

De kenmerken prijs en VBT beïnvloeden voornamelijk de flexibiliteit in de bevoorrading. Bij dure onderdelen wordt getracht de voorraad laag te houden. Hierdoor blijft er maar weinig ruimte over om planningsverhogingen op te vangen.

Een lange VBT betekent dat de behoefte lang van tevoren kenbaar gemaakt moet worden.

De kenmerken jaarplanning en optie-afhankelijkheid zijn van invloed op de planningbetrouwbaarheid. Een laag jaarplan leidt vaak tot een minder stabiel en minder voorspelbaar afnamepatroon.

Bij optie-afhankelijke onderdelen is de kans groot dat indien de uitvoering van de machine wordt gewijzigd, dit de behoefte aan het betreffende onderdeel beïnvloedt.

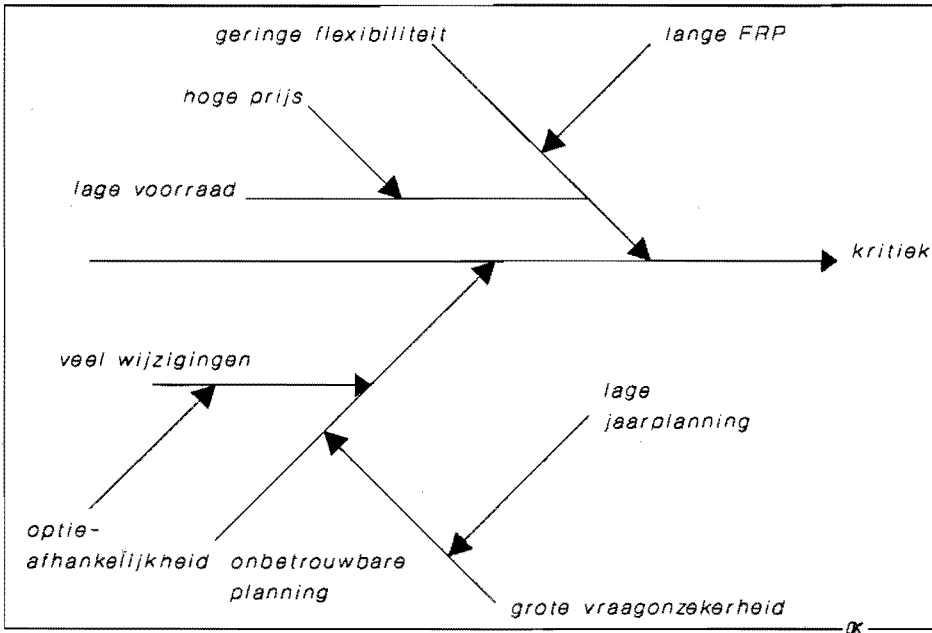
De bovengenoemde factoren en hun oorzaken zijn in figuur 6 weergegeven in een zogenaamd Ishikawa diagram.

6. Oplossingsmodel

- *Critical parts (CPM)*

De Purchasing Product Portfolio (PPP) is een hulpmiddel dat werd geïntroduceerd door Kraljic en uitgewerkt door Van Weele¹ als hulpmiddel bij de keuze van een inkoopstrategie. De verdeelt producten in vier groepen op basis van de produktkenmerken prijs-risico en logistiek-risico.

Om te komen tot een definitie van het begrip 'kritische onderdelen' zal de PPP als uitgangspunt worden genomen. Hierbij zullen dan wel andere produktkenmerken worden gehanteerd, namelijk die welke eerder zijn genoemd: prijs, jaarplan, VBT en optie-afhankelijkheid.



Figuur 6. Kenmerken van kritische onderdelen en de oorzaken daarvan

De vier dimensies zijn als volgt terug te vinden in het model dat is weergegeven in tabel 1. Op de twee assen van de zijn jaarplan en VBT aangegeven; binnen de is aangegeven welke onderdelen kritisch zijn en waarbij het verschil tussen wél optie-afhankelijke en niet optie-afhankelijke onder delen nog kenbaar is gemaakt. Per prijsgroep is een aparte matrix opgesteld.

Tabel 1. Critical Parts (CPM)

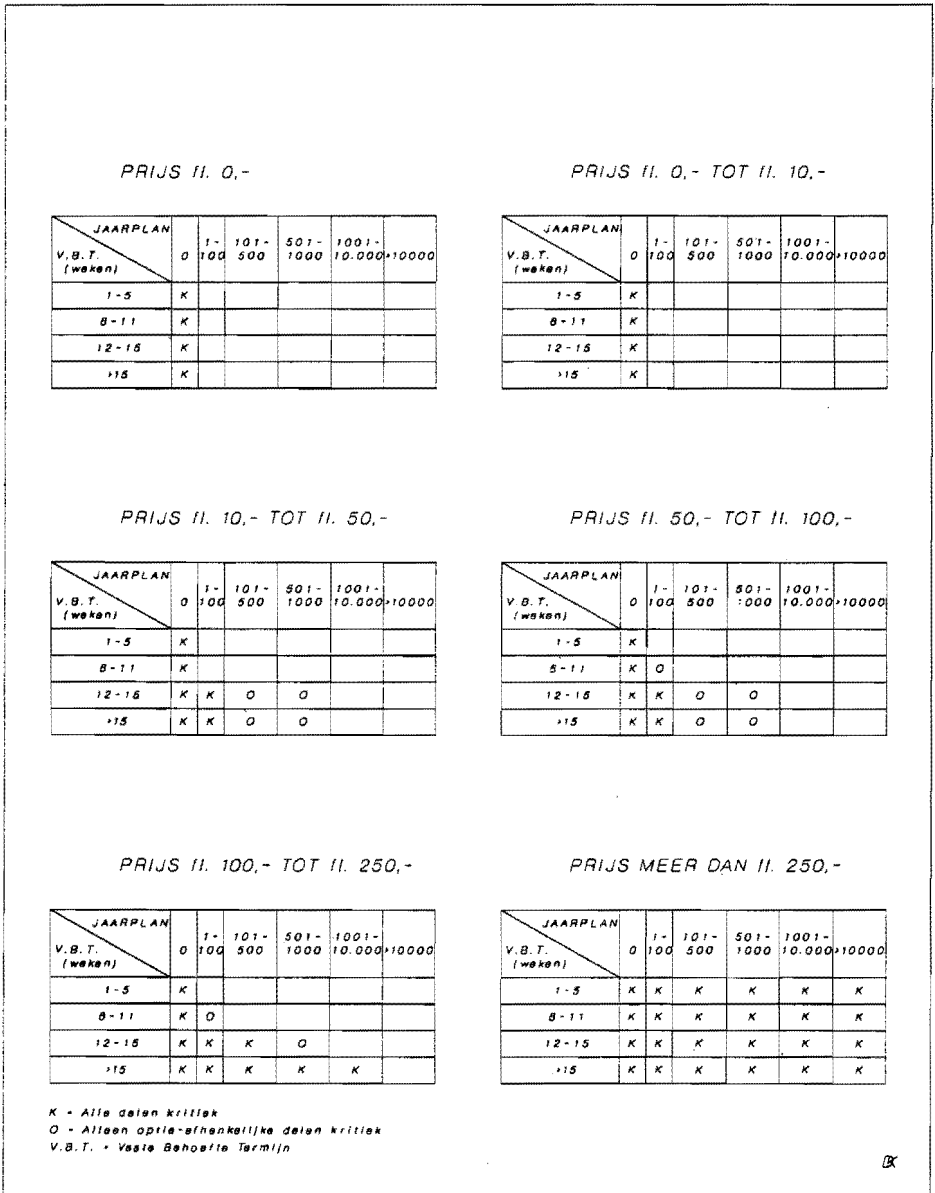
	(prijs f 0, -)					
	0	1-100	101 - 500	501 - 1000	1001 - 10.000	> 10.000
VBT (weken)						
1 - 5						
6 - 11			K			
12 - 15			O			
> 15						

K = alle delen kritiek
 O = alleen optie-afhankelijke delen kritiek
 VBT = vaste behoefte termijn

De CPM wordt gebruikt door de materiaalplanner om te bepalen of een onderdeel wel of niet kritisch is. Het is daarbij uiteraard altijd mogelijk, dat de planner een andere beslissing neemt. Hij kent namelijk omstandigheden die niet door het model worden onderscheiden.

– Simulatie en aanpassing van het model

Om te komen tot een schatting van het aantal onderdelen in het toekomstige kritische onderdelenbestand is een computersimulatie uitgevoerd op het daarvoor in aanmerking komende deel van het onderdelenbestand bestaande uit circa 40.000 onderdelen. Daarbij is uitgegaan van een parameter invulling van het model zoals weergegeven in figuur 7.



Figuur 7. Parameters van de Critical Parts Per prijsgroep is een aparte opgesteld.

Het resultaat was een kritische onderdelenbestand met 12.000 ongeplande delen en 9.000 geplande delen. Het kritische onderdelenbestand zou derhalve toenemen met 9.000 ongeplande en 4.000 geplande onderdelen. De grootste toename is dus een gevolg van het toevoegen van ongeplande onderdelen. Omdat het ongeplande onderdelen betreft betekent deze toevoeging geen al te grote extra belasting voor de, met behulp van het bestand uit te voeren, materiaalbeschikbaarheids controles.

Uit de simulatie blijkt ook dat het aantal kritische onderdelen in de groep laaggeprijsde onderdelen sterk toeneemt, met name bij de onderdelen tussen f 10,- en f 50,-. Het is daarom aan te bevelen vooralsnog deze onderdelen, voorzover ze niet optie-afhankelijk zijn en een VBT kleiner dan of gelijk 16 aan weken, niet kritisch te maken. Dit betekent wel dat voor deze onderdelen extra voorraad moet worden aangehouden. Door deze wijziging van het model neemt het aantal kritische onderdelen af met ongeveer 2500. De verdeling, die aldus ontstaat, wordt getoond in tabel 2.

Tabel 2. Omvang van het kritische onderdelenbestand

<i>prijs</i>	<i>oude aantal</i>	<i>nieuwe aantal</i>
<i>nul-geplande delen</i>	2.965	12.165
<i>geplande delen</i>		
Fl. 0,- / 10,-	626	0
Fl. 10,- / 50,-	847	681
Fl. 50,- / 100,-	605	1.348
Fl. 100,- / 250,-	501	1.562
meer dan FL. 250,-	1.949	2.565
totaal gepland	4.431	6.156
Totaal	7.396	18.321

Voor de beheersbaarheid van de bestanden zou het een goede zaak zijn de ongeplande en de geplande onderdelen in aparte bestanden te plaatsen. Er wordt dan gesproken over kritische onderdelen en ongeplande onderdelen.

Het voorgestelde model werkt met vier produktenmerken en geeft een acceptabel kritisch onderdelenbestand. Er kan zich echter een situatie voordoen dat een bepaalde groep onderdelen wel in het kritische onderdelenbestand zou thuis horen, maar door het model niet als kritisch wordt erkend.

Bijvoorbeeld als een leverancier te kampen heeft met gebrek aan productiecapaciteit. In een dergelijke situatie kunnen bepaalde groepen produkten worden geselecteerd op basis van het leveranciersnummer. Als de problemen zijn opgelost kunnen de onderdelen worden afgevoerd uit het kritische onderdelenbestand. Op deze wijze kunnen tijdelijk kenmerken aan het model worden toegevoegd.

7. Operationalisatie van het model

Om te beginnen moeten de produktkenmerken, op grond waarvan de CPM onderdelen selecteert, eenduidig worden vastgesteld. Die kenmerken zijn besproken in punt 6.

Vervolgens dient het gebruik van de CPM nader te worden vastgelegd. Het gebruik valt uiteen in de initiële selectie van nieuwe kritische onderdelen en het periodiek 'screenen' van het bestand. Daarbij speelt uiteraard de wens een rol dat dit zo min mogelijk werk met zich mee moet brengen.

Op het moment dat er een nieuw produkt komt, worden de produktkenmerken vastgesteld. Het model geeft op basis van deze produktkenmerken een advies; wel of niet kritisch.

Daarna neemt de materiaalplanner op basis van dit advies en eventueel aanvullende informatie een beslissing.

Stemt het advies van de CPM met de beslissing van de materiaalplanner overeen, dan is periodieke controle van deze delen niet meer nodig. Dit beperkt de hoeveelheid werk voor de planner aanzienlijk.

Indien het advies van de CPM en de beslissing van de materiaalplanner niet overeenstemmen, dan zijn er blijkbaar factoren in het spel, die niet in het model zijn opgenomen en die de materiaalplanner wel ziet. Anderzijds is het ook mogelijk dat kenmerken, op basis waarvan een deelkritiek was, gewijzigd zijn zonder dat de materiaalplanner daar erg in had.

Signalering van deze delen geeft de materiaalplanner de mogelijkheid hier aandacht aan te schenken. Als blijkt dat bepaalde onderdelen langdurig voorkomen op een screeningslijst, dan kan overwogen worden de redenen hiervoor nader te onderzoeken. Zo'n onderzoek kan aanleiding zijn tot:

- bijstellen van de modelparameters of produktparameters
- ter discussie stellen van de inzichten van de materiaalplanner.

Ongeplande onderdelen waarbij sprake is van een veranderde situatie worden gesignaleerd, tot er weer een stabiele situatie ontstaat. Het gaat hier om wijziging in de planningstatus of in de status wel/niet kritisch.

Delen die niet kritiek zijn, maar waarbij zich de afgelopen periode een voorraadtekort hebben voorgedaan, worden enige tijd ook gesignaleerd alsof zij kritisch zijn. Dit kan problemen aan het licht brengen.

Screening van het bestand wordt uitgevoerd door de materiaalplanner. Controle door groepsleiders kan gebeuren door periodiek te bezien wat de redenen zijn dat een materiaalplanner afwijkt van de adviezen van het model.

Op welke wijze tenslotte de materiaalbeschikbaarheidscontrole met behulp van het kritische onderdelenbestand wordt uitgevoerd is al beschreven.

Literatuur

1. Weele, van A. J. ; *Purchasing Control, Performance measurement and evaluation on th industrial purchasing function*. Wolters Noordhoff, Groningen 1984.
2. Terhenne, H. D. ; *Kritische delen binnen het materiaalver vende proces in relatie tot de orderacceptatie*. TUE 1989.

Het afstudeerrapport van H. D. Terhenne verscheen reeds eerder, herschreven door M. Igel, in *Doelmatige Bedrijfsvoering*, Jrg. 2, Nr. 4, april 1990

VOORRAADBEHEERSING

INLEIDING

Voorraadbeheersing in het onderhoud is een speciale sector, waar de conventionele methoden slechts beperkt geldig zijn.

In zijn lezing voor het NVDO-congres van 1982 heeft Geraerds een raamwerk geschetst waarbinnen alle 'Typische aspecten van de voorraadbeheersing in het onderhoud' kunnen worden geplaatst (in *Bedrijfsvoering* van februari 1983 is deze voordracht als artikel opgenomen). Pas als een gebied op deze wijze systematisch gestructureerd is, kan er zinvol gedetailleerd, gemodelleerd en gerekend worden; pas dan kan van eventuele wiskundige hoogstandjes de toepasbaarheid en het belang worden aangegeven.

Als hoofdpunten heeft Geraerds onderscheiden:

- herkomst van de vraag
- assortiment
- frequentie van de vraag
- levensduurfasen
- de aanloophase (waarbij aan de orde komen: risicodelen, repareerbare delen, essentialiteit, voorspelbaarheid van de vraag, verwervingstijd)
- stationaire fase
- afvoerfase
- handigheden.

In dit gedeelte van het voor u liggende boek zullen zeker niet alle hoofdpunten aan de orde komen. U zult bewerkingen aantreffen van enkele eerdere publicaties door de auteur zelf of door de redactie uitgevoerd.

De bijdrage door Schouten-Niëns ging over repareerbare reserve delen en deelde deze op systemische wijze in categorieën in op basis van inzicht in onderhoudsproblematiek en met het oog op de gewenste methoden van voorraadbeheersing.

Janssen behandelde voor de voorraad reservedelen aan boord van een schip de vraag, welke delen *wel* in voorraad moeten worden gehouden, waarbij enerzijds investering en anderzijds essentialiteit van groot belang zijn.

Van 't Hullenaar ging voor een groep bestaande uit een groot aantal vliegtuigen na, of er correlatie bestond tussen het aantal vliegtuigen en het aantal gevraagde reservedelen en zo ja, of een dergelijke correlatie kan worden gebruikt om de behoefte beter te voorspellen.

Brackel en Van Winkel bespraken een belangrijk aspect van het systeem METRIC, namelijk: hoe moeten, bij een gegeven budget in geld, de middelen worden toegewezen aan de verschillende items in een zeer groot assortiment, zodanig dat een criterium (in dit geval het aantal backorders) wordt geoptimaliseerd (hier: geminimaliseerd).

De systematische indeling van niet-repareerbare reservedelen in voorraadbeheersingscategorieën

21

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. R.M.J. Schouten-Niëns en samengevat en bewerkt door ing. E.J.L. Lamberti

1. Inleiding

De vraag naar reservedelen bij een onderhoudsbedrijf verschilt op een aantal punten van de vraag naar artikelen in een productie- of distributiebedrijf.

Het onderwerp van dit onderzoek is: het ontwerpen van een beslissingsprocedure om reservedelen, bestemd voor het onderhoud van het rollend materieel bij NS, in te delen in verschillende voorraadbeheersingscategorieën. Dit wordt nodig geacht omdat de vraag, prijs, levertijd en dergelijke van reservedelen sterk kan variëren.

De ontwikkelde beslissingsprocedure is gegoten in de vorm van een schema, waarin voor elk onderdeel een aantal vragen moeten worden beantwoord. Afhankelijk van de antwoorden wordt een bepaalde route doorlopen die uitmondt bij een beheersingscategorie.

Het schema kan toepassing vinden bij de indeling van niet-repareerbare reservedelen (slijtdelen) binnen een uitgebreid voorraadbeheersingssysteem.

2. Probleemstelling en opdrachtformulering

Het bij NS gehanteerde voorraadbeheersingssysteem werkt op basis van historische gegevens. Dit functioneert niet naar wens wat betreft de beheersing van reservedelen voor rollend materieel.

Bij de vraag naar reservedelen komen vaak aanzienlijke fluctuaties voor. Regelmatig ontstaan er daardoor grote overschotten

of nijpende tekorten. Een aanzienlijk deel van het onderdelenverbruik wordt veroorzaakt door onderhoudsbeurten. Daarom zijn de mogelijkheden te onderzoeken om de besturing van de benodigde onderhoudscapaciteit – welke af te leiden is uit de onderhoudsplanningen – als mede de bestelling van onderdelen en mate-

rialen te herstructureren op basis van het Manufacturing Resource Planning (MRP) concept.

In eerst instantie zou het deel van de *besturing*, dat betrekking heeft op materiaalbehoefte-planning, moeten worden verbeterd. De capaciteitsbehoefte-planning en de werkorderplanning zouden niet in dit onderzoek worden beschouwd.

De voorlopige opdrachtformulering luidde dan ook:

‘Analyseer de mogelijkheden en problemen van het gebruik van de time-phased orderpoint techniek voor de koppeling van de materiaalbestellingen aan de onderhoudsplannen van het rollend materieel van de NS, en houdt hierbij zoveel mogelijk rekening met bestaande systemen op het gebied van materiaalbevoorrading. Onderdeel van de analyse is: het opstellen van een globale kosten-/baten-analyse van het gebruik van de timephased orderpoint techniek vergeleken met de huidige situatie.’

Bij nader onderzoek bleek deze formulering de opdracht onvoldoende af te bakenen. In het bijzonder kwam bij een tussentijdse rapportage naar voren, dat het toepassen van MRP (E: Manufacturing Resource Planning) dat grote voorspelbaarheid als uitgangspunt heeft bij voorbaat onvoldoende rekening hield met de vele onzekerheden in het onderhoud.

Dit leidde tot de volgende herformulering van de opdracht:

‘Stel criteria op aan de hand waarvan de onderdelen ten behoeve van de reparatie en het onderhoud van rollend materieel kunnen worden ingedeeld in voorraadbeheersingscategorieën.

‘Ontwerp met behulp van bovengenoemde criteria een beslissingsregel, door middel waarvan elk onderdeel systematisch aan een categorie kan worden toegevoegd.

‘Inventariseer welke gegevens geregistreerd moeten worden om deze beslissingsregel te kunnen toepassen.’

– *Het onderhoud van rollend materieel*

Een van de diensten binnen NS is de Dienst van Materieel en Werkplaatsen. Deze dienst verzorgt onder meer:

- de instroming van nieuw materieel in de zin van opstellen van gebruikerseisen, keuze van leveranciers en evaluaties van ontwerpen
- het onderhoud en herstel van alle rollend NS-materieel.

Onderhoud en reparaties worden verricht in drie hoofdwerkplaatsen en zes lijnwerkplaatsen.

– *Hoofdwerkplaatsen*

De hoofdwerkplaatsen verzorgen het lange-termijn onderhoud. Dit bestaat uit

revisies die afhankelijk van het type materieel om de 4 tot 7, 5 jaar, of op kilometer-basis plaatsvinden.

Om een spreiding in de werklast te bewerkstelligen, neemt men voor een bepaalde onderhoudsbeurt een deel van de betreffende materieelserie *eerder* in onderhoud. Onderhoudsbeurten uitstellen, met andere woorden de termijn overschrijden, is mede door stringente wettelijk bepaalde veiligheidseisen alleen bij uitzondering en onder strikte technische voorwaarden toegestaan.

De revisie-termijnen zijn opgenomen in een zogenoemde A-staat.

Daarnaast worden in de hoofdwerkplaatsen *grote* bots- en brand-schades en defecten hersteld.

De hoofdwerkplaatsen zijn ingedeeld naar *soort materieel*:

- locomotieven
- reizigersmaterieel
- goederenmaterieel

Elke hoofdwerkplaats heeft een afdeling, waar onderhoud direct aan het materieel wordt verricht. Dit is de *stelplaats*, waar de zogenoemde bak-revisies (casco-revisies) plaatsvinden.

Daarnaast is er een aantal afdelingen, waarin onderdelen revisie krijgen of hersteld worden, en waarin ook nieuwe onderdelen worden aangemaakt.

- *Lijnwerkplaatsen*

De lijnwerkplaatsen verzorgen het korte-termijn onderhoud.

Hieronder verstaat men bij NS:

- normale onderhoudsbeurten
- periodieken
- tussenrevisies.

Voor de *normale onderhoudsbeurten* is in de dienstregeling ingepland: eenmaal per vijfendertig dagen een bezoek aan de werk plaats. Het gaat hierbij voornamelijk om toestandsafhankelijk onderhoud, verdeeld naar de vakgebieden: elektrisch, mechanisch/pneumatisch en eventueel 'diesel'.

Daarnaast worden aan sterke slijtage of veroudering onderhevige onderdelen vervangen volgens voorschrift, en vindt de voorgeschreven verversing plaats van smeermiddelen. De werkplaats-onderhouds-termijnen zijn opgenomen in een zogenoemde C-staat.

Een *periodiek* omvat de voorgeschreven vervanging van bepaalde onderdelen en gebeurt op tijdbasis. Ook het 'winter- en zomer-klaar' maken van materieel valt onder de periodieken.

De lijst van componenten en termijnen van de periodieken zijn opgenomen in de zogenoemde B-staat.

Een periodiek wordt in het algemeen verricht tijdens een normale onderhoudsbeurt.

Tussenrevisies vinden plaats ongeveer halverwege twee revisies in de hoofdwerkplaats. Een tussenrevisie omvat de voorgeschreven vervanging van een pakket onderdelen volgens de B-staat, waarvan een veilige, c. q. storingsvrije werking, gedurende een hele revisietermijn niet kan worden verwacht. De tussenrevisie termijnen zijn opgenomen in de zogenoemde A-staat.

In de lijnwerkplaatsen worden ook *kleine* bots- en brandschades en defecten hersteld. Deze herstellingen worden de *extra binnenkomsten* genoemd. De werkplaatsen verrichten het correctieve onderhoud bijna uitsluitend door verwisseling van componenten

Daarnaast worden er door de gronddienst *reparaties buiten de werkplaats* verricht. De bevoegdheden van de gronddienst zijn in een regeling vastgelegd.

– *Onderhoud aan hoofddelen*

Hoofddelen – dit zijn belangrijke basisdelen zoals generatoren wiel- en draaistellen, en diesel- en tractiemotoren hebben een eigen revisietermijn onafhankelijk van de bakken (carrosserie plus remwerk, luchtslangen, meetapparatuur, interieur en dergelijke). Deze revisietermijn is afhankelijk van het soort hoofddeel op kilometer- of tijdbasis.

Hoofddelen worden in de lijnwerkplaatsen uit het treinstel of uit de locomotief *uitgebouwd*.

Revisie van een hoofddeel vindt plaats in een hoofdwerkplaats; voor de generatoren en tractiemotoren bij een dochteronderneming van NS. Ook kennen de hoofddelen tussenrevisies.

– *De voorraadbeheersing ten behoeve van het onderhoud*

De magazijnen van NS maken deel uit van de Dienst van Inkoop en Magazijnen (Im). Hiertoe behoren de magazijnen vanuit welke de onderdelen-uitgifte voor het onderhoud plaatsvindt maar ook andere magazijnen zoals: het Algemeen Magazijn te Utrecht (AMU) en de magazijnen ten behoeve van de Dienst van Infrastructuur, die onderhoud en aanleg van spoorlijnen verzorgt. Deze laatste groep magazijnen wordt in dit onderzoek niet nader beschouwd.

De reservedelen-magazijnen zijn onderverdeeld in drie hoofdmagazijnen, die zijn verbonden aan en gesitueerd bij een hoofdwerkplaats. Daarnaast zijn er zes lijnmagazijnen die zijn verbonden aan en gesitueerd bij een lijnwerkplaats.

De onderdelen worden centraal opgeslagen in de hoofdmagazijnen elk hoofdmagazijn heeft zijn eigen assortiment reservedelen.

Een hoofdmagazijn bedient de lijnmagazijnen voorwat betreft de onderdelen die de bijbehorende lijnwerkplaats nodig heeft, en de overige hoofdmagazijnen voor wat betreft de onderdelen die aldaar niet centraal zijn opgeslagen en de bijbehorende hoofdwerkplaats nodig heeft.

– *Het huidige bevoorradingssysteem*

De verwerking van de gegevens gebeurt op basis van ADVOMA *on-line*, met behulp van in de diverse magazijnen opgestelde computers. Deze computers zijn onderling verbonden en in elk magazijn bevinden zich een of meer *terminals*, die op het systeem zijn aangesloten.

De gehanteerde bestelmethode is die van *minimum voorraad en optimale bestelserie*. De optimale bestelserie wordt bepaald met behulp van de gemiddelde afname over de laatste 13 perioden.

Bij *slowmovers* beschouwt men de gemiddelde afname over een termijn, die 3 perioden met een afname groter dan 0 bevat, en minimaal 13 perioden omvat. De veiligheidsvoorraad wordt bepaald met behulp van een aantal veiligheidsfactoren. De bestelling wordt als *inkoop-order* naar een van de inkoop-groepen gestuurd van waaruit extern wordt besteld.

Indien evenwel 'interne' fabricage of herstelling in de hoofdwerkplaats goedkoper is wordt het onderdeel met behulp van een interne opdrachtbon (IO) door het hoofdmagazijn besteld bij de betreffende afdeling van de hoofdwerkplaats.

– *Een indeling van reservedelen*

Er wordt onderscheid gemaakt tussen:

- slijtdelen
- wisseldelen
- retourdelen
- hoofddelen.

Slijtdelen zijn onderdelen die na vervanging worden weggegooid. Vervanging van slijtdelen vindt plaats bij een bepaalde onderhoudsbeurt:

- bij het optreden van een storing;
- indien voorgeschreven;
- of eventueel na inspectie.

De slijtdelen worden extern ingekocht of in de hoofdwerkplaats aangemaakt.

Wisseldelen zijn onderdelen die na vervanging kunnen worden gerepareerd.

Vervanging van wisseldelen gebeurt tijdens een onderhoudsbeurt – bij een storing;

- of gebruiksafhankelijk
- of toestandsafhankelijk.

De vervangen wisseldelen worden ingeleverd bij het hoofdmagazijn. Als in het hoofdmagazijn de voorraad herstelde wisseldelen daalt beneden het gestelde minimum dan wordt een serie nog niet herstelde wisseldelen naar de hoofdwerkplaats gestuurd om hersteld te worden, en daarna in het hoofdmagazijn op voorraad gelegd.

Het komt voor dat een wisseldeel niet meer is te repareren, en daarom moet af en toe de totale wisseldelenhoeveelheid op peil worden gebracht d.m.v. een bestelling van nieuwe exemplaren.

Een wisseldeel kan slijtdelen en andere wisseldelen bevatten.

Retourdelen zijn onderdelen die tengevolge van onvoldoende uitwisselbaarheid slechts op één bepaalde plaats passen in het materieel waarin ze voorkomen. Zij moeten daarom binnen de doorlooptijd van het revisie-proces worden gereviseerd en, na herstelling in de hoofdwerkplaats, weer op dezelfde plaats in het materieel worden teruggeplaatst (*retour*).

Niet meer te repareren retourdelen moeten worden vervangen. Retourdelen kunnen slijt- en wisseldelen bevatten.

Hoofddelen zijn belangrijke assemblages zoals: de generatoren, dieselmotoren, tractiemotoren en wiel- en draaistellen.

Zij worden niet beschouwd als onderdelen; zij leiden een eigen leven wat betreft het onderhoud met eigen onderhoudstermijnen.

Principieel echter verschillen zij niet van wisseldelen.

3. Methode van aanpak

Alvorens een methode van aanpak te beschrijven, is het noodzakelijk om iets te vermelden over de typische aspecten van voorraadbeheersing in het onderhoud. Ten eerste is de herkomst van de vraag verschillend. De vraag bij een productiebedrijf is afkomstig van de klant. Bij bedrijven met een beperkt assortiment is deze, in het algemeen, vrij goed vooraf te bepalen, vaak zelfs aan de hand van plannings. Bedrijven met klantgerichte-opdrachten vormen hierop een uitzondering.

Bij een onderhoudsbedrijf vloeit de vraag naar onderdelen voort uit het gebruik van de produktiemiddelen. De volgende *soorten vraag naar onderdelen* kunnen daarbij worden onderscheiden:

– *gebruiksafhankelijke*

een onderdeel wordt volgens voorschrift vervangen tijdens een onderhoudsbeurt;

– *toestandsafhankelijke*

een onderdeel wordt tijdens een onderhoudsbeurt vervangen als bij inspectie is gebleken dat een bepaalde norm is onderschreden;

– *storingsafhankelijke*

er treedt tussentijds een storing op en een directe vervanging van het onderdeel is noodzakelijk, dat wil zeggen reparatie of uitstel is onmogelijk.

Hieruit blijkt dat de grootte van de vraag bij onderhoudsdelen niet volledig met behulp van planningen is te bepalen. Voor de voorgeschreven vervanging van onderdelen, is een gebruikmaking van planningen van de onderhoudsbeurten eventueel mogelijk.

Ook voor onderdelen, die een vrij grote kans hebben om vervangen te worden na inspectie bij een onderhoudsbeurt kan gebruik van planningen voordeel opleveren. Echter, wanneer de kans op vervanging, na inspectie bij een beurt, erg klein is, zal het voordeel minimaal zijn.

Wanneer storingen zullen optreden is niet bekend zodat hier gebruik van planningen principieel onmogelijk is. Voor het optreden van storingen bij een onderdeel kan men in het beste geval proberen een kansverdeling te bepalen.

In de tweede plaats is de vraag naar artikelen in productiebedrijven en distributiebedrijven in het algemeen groot in vergelijking tot de vraag naar onderdelen bij een onderhoudsbedrijf

Conventionele voorraadtheoriën zijn gebaseerd op *statistische* modellen van de vraag. Naar mate de vraag kleiner is verliezen deze modellen aan bruikbaarheid. De *spreidingscoëfficiënt* van de vraag wordt erg groot en voldoende nauwkeurige voorspellingen zijn niet meer mogelijk.

Hoewel onderhoudsvoorraden ook artikelen bevatten met een redelijk grote vraag, wordt een groot gedeelte van de vraag echter toch uitgemaakt door de artikelen met een lage, tot zeer lage vraag. Dit als men aantallen beschouwt maar nog sterker als men de investering in voorraden beschouwt; omdat artikelen met een lage vraag in het algemeen duurder zijn dan de snellopende artikelen. Bij onderhoud is het niet mogelijk om deze artikelen *uit* het assortiment te nemen; dit in tegenstelling tot bij de productiebedrijven. Voor een bepaling van de hoogte van deze voorraad van lanzaamlopende artikelen voldoen statistische berekeningen niet en zal dit in overleg met deskundigen moeten gebeuren.

De vraag naar onderdelen is bovendien nogal grillig en dientengevolge moeilijk beheersbaar zodat één beheersingsmethode hierbij niet voldoende zal zijn. Afhankelijk van de karakteristieken, van onder andere de vraag, is een andere methode optimaal.

Om een – in de praktijk hanteerbare – *beslissingsregel* voor de keuze van een beheersingsmethode voor een onderdeel te ontwikkelen is gebruik gemaakt van de volgende aanpak:

- het inventariseren van bestaande mogelijke categorieën, met de bijbehorende beheersingsmethoden;
- het ontwikkelen van criteria aan de hand waarvan men de onderdelen kan indelen onder de hiervoor genoemde categorieën, en het formaliseren hiervan in een beslissingsregel;

- het vaststellen van de waarden voor de in de beslissingsregel opgenomen variabelen;
- het vaststellen van welke gegevens nodig zijn voor een toepassing van de beslissingsregel en in welke vorm;
- inventariseren, in hoeverre deze gegevens nu al worden geregistreerd;
- het selecteren van een beperkt aantal onderdelen ten behoeve van een eerste toetsing;
- toetsen van de beslissingsregel met behulp van hiervoor genoemde geselecteerde onderdelen en het eventueel aanpassen van de beslissingsregel;
- het vaststellen van termijnen waarop de relevantie van de gehanteerde indeling van een onderdeel gecontroleerd moet worden Dit zou kunnen variëren per categorie of per groep categorieën. Controle houdt in: het opnieuw doorlopen van de beslissingsregel voor een onderdeel;
- het doen van aanbevelingen met betrekking tot de invoering van de beslissingsregel en eventuele verdere toepassingsmogelijkheden van de indeling in categorieën.

4. Het beslissingsschema beheersingscategorieën

In principe kunnen er drie beheersingscategorieën voor reservedelen worden onderscheiden en deze kunnen behalve afzonderlijk ook in combinatie voorkomen:

- *incidenteel beslissen*

dit is noodzakelijk indien de vraag zo laag is, dat geen passend statistisch model eraan is toe te kennen en bovendien de vraag niet afhankelijk is van planningen;

- *met behulp van statistische modellen beheersen*

deze groep wordt gebruikt als de vraag onafhankelijk is van geplande onderhoudsbeurten en op de vorm van de vraag een statistisch model van toepassing is;

- *met behulp van planningen en onderhoudsbeurten beheersen*

in dit geval is tenminste een deel van de vraag afhankelijk van de geplande onderhoudsbeurten.

- *De opzet van het beslissingsschema*

Bij het ontwerpen van het beslissingsschema is uitgegaan van de afweging van het nut van gebruikmaking van planningen voor de voorspelling van de vraag naar een onderdeel.

Hierbij kwamen onderstaande aspecten in de hier aangegeven logische volgorde aan de orde:

- *in principe mogelijk*

heeft men de mogelijkheid om van planningen gebruik te maken ?

– *economisch interessant*

is gebruikmaking van planningen interessant gezien prijs en verdeling van de vraag naar het onderdeel ?

– *praktisch mogelijk*

is gebruikmaking van planningen voor een onderdeel interessant als men de gemiddelde vraag en spreiding van die vraag per type geplande onderhoudsbeurt beschouwt ?

– *wat maakt het uit*

maakt het gedeelte van de vraag waarbij gebruikmaking van planningen nuttig zou zijn een voldoende grote fractie uit van de totale vraag naar het onderdeel ? Met deze vier vragen is de opzet van het beslissingsschema gekarakteriseerd (zie figuur 1).

Het schema bestaat uit beslissingsmomenten met daarbij behorende vragen waarbij, afhankelijk van de antwoorden op de vragen, een route door het schema wordt bepaald die uitkomt bij een bepaalde beheersingscategorie.

De vragen zijn zo geformuleerd, dat er als antwoord slechts *ja* of *nee* mogelijk is. Dit is gedaan, om de beslissingen zoveel mogelijk te kunnen formaliseren en eventueel te kunnen automatiseren; en daarom de bij elke beslissing behorende argumentatie eenvoudig te houden.

De lay-out van het schema is opgezet als volgt:

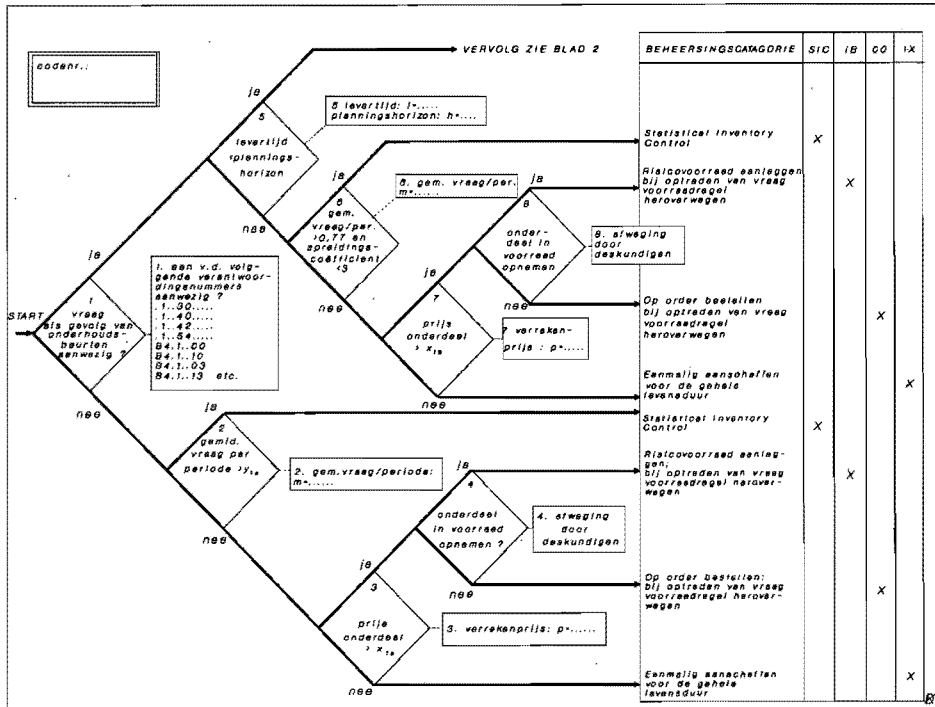
Het schema wordt van links naar rechts doorlopen. Bij een positief antwoord op de vraag moet men de weg naar *boven* volgen; bij een negatief antwoord de weg naar *beneden*.

Hoe eenvoudiger de vorm en herkomst van de vraag naar onderdelen zijn des te eerder bereikt men een van de beheersingscategorieën. Om in een oogopslag te kunnen zien welke beheersingsmethoden op welke plaats voorkomen is de indeling in afkortingen opgenomen aan de rechterkant in het schema.

– *De gehanteerde criteria*

Een eerder verrichte studie geeft inzicht in de criteria, die in de literatuur worden gebruikt voor de indeling van reservedelen. De uitgangspunten die daar worden genoemd zijn:

- de *vraag* : de *grootte* van de vraag en de *herkomst* van de vraag;
- de *repareerbaarheid*;
- de *essentialiteit*;
- de *identificatie*;
- de *prijs*;
- de *levertijd*;
- de *planningshorizon* van de onderhoudsbeurten.



Figuur 1. Beslissingsschema beheersingscategorien (blad 1, 2 en 3)

De gemiddelde grootte van de vraag is van belang voor de statistische voorspelbaarheid. Bij perioden met zeer lage vraag zijn nauwkeurige statistische voorspellingen onmogelijk vanwege gebrek aan (historische) gegevens. Omdat de spreidingscoëfficiënt in dat geval groot zal zijn, zullen ook de vereiste veiligheidsvoorraden – relatief groot zijn. Daarom zal men bij zeer lage vraag geen gebruik kunnen maken van statistische methoden, maar moeten uitgaan van de verwachten van deskundigen. Het betreft hier in het algemeen het op voorraad leggen van nul, een, twee of drie exemplaren van een reserveonderdeel.

Echter ook bij een relatief grote gemiddelde vraag is een grote spreidingscoëfficiënt mogelijk, hetgeen de periodevoorspelling met behulp van statistiek bemoeilijkt.

Ook de herkomst van de vraag zal van belang zijn. In de literatuur wordt er onderscheid gemaakt tussen:

- onderdelen onderhevig aan slijtage, en
- statische delen die in buitengewone gevallen defect kunnen raken en waarbij de invloed op het functioneren van de installatie aanzienlijk kan zijn.

Dit onderscheid zal hier niet gebruikt worden, omdat dit impliciet de criteria grootte van de vraag en essentialiteit bevat, en via die wegen verwerkt kan worden.

Daarnaast worden, met betrekking tot de herkomst van de vraag, ook onderscheiden:

- onderdelen, die nodig zijn voor de geplande beurten;
- onderdelen, waarvan bij een storing de vervanging uitgesteld kan worden met een periode langer dan de levertijd;
- onderdelen, waarbij spontaan een storing optreedt en de vervanging direct noodzakelijk is.

Als variant hierop worden bij dit onderzoek de volgende soorten van vraag onderscheiden:

- de vraag voortvloeiend uit een *onderhoudsbeurt*, vanwege een voorgeschreven vervanging of vervanging na inspectie;
- de vraag als gevolg van een *storing*, die tussen de beurten optreedt én direct verholpen moet worden.

De eerste soort vraag zal hier de *deterministisch voorspelbare vraag*, ook wel *deterministische vraag* worden genoemd; de vraag met storingen als herkomst wordt genoemd *stochastisch voorspelbare vraag*.

Bij de laatste soort vraag is gebruikmaking van planningen van de onderhoudsbeurten voor de voorspelling, principieel onmogelijk; terwijl bij de deterministisch voorspelbare vraag onder bepaalde voorwaarden die mogelijkheid wel bestaat.

De *repareerbaarheid* is in zoverre van invloed dat technisch en economisch repareerbare onderdelen van het onderzoek zijn uitgesloten; dit zijn (bij NS) de zogenoemde wisseldelen.

De reden hiervan is, dat de beheersing van de wisseldelenvoorraad geschiedt op basis van het onderhoudsconcept van het betrokken technisch systeem.

Dit is naar zijn aard geen voorraadbeheersing, maar vormt een deel van de voorbereiding en planning van onderhoud.

De *essentialiteit* geeft de mate aan waarin een onderdeel onmisbaar wordt geacht. Deze kan worden uitgedrukt in afwezigheidskosten. Vooral bij lage vraag is de essentialiteit van belang en wel bij de beslissing of men nul, een, twee of meer exemplaren van een onderdeel op voorraad zal leggen.

Op dit punt is essentialiteit ook bij dit onderzoek van belang. Naarmate de essentialiteit groter is zullen de kosten van buitenvoorraadragen hoger zijn en zal men geneigd zijn meer stuks op voorraad te leggen.

De *identificatie* van een onderdeel gebeurt door middel van codering. In de bij NS gehanteerde codering is een indeling opgenomen naar herkomst of naar functie. Omdat deze categorieën geen kenmerkende verschillen impliceren met betrekking tot de beheersing van de voorraden is de identificatie voor dit onderzoek niet van belang.

De *prijs* van een onderdeel is van invloed op de voorraadkosten van dat onderdeel. Als de prijs van een reservedeel laag is mogen de beheersingskosten voor dat reservedeel niet hoog zijn.

Immers de 'extra' beheersingskosten mogen niet groter zijn dan hetgeen bespaard kan worden aan voorraadkosten bij gebruik van een bepaalde voorraadbeheersingsmethode.

Bij een goedkoop onderdeel moet men daarom, op een eenvoudige wijze zorgen dat er voldoende voorraad aanwezig is en kan men de minimumvoorraad gemakkelijk iets hoger stellen, zonder dat het kapitaalbeslag snel groter wordt.

Als de prijs van een onderdeel hoog is en de vraag laag dan is de vraag moeilijk statistisch te voorspellen en is gebruikmaking van plannings bij de voorspelling – indien mogelijk – interessant. Dit geldt zeker bij een zeer lage vraag. In het laatste geval is het zeer wel mogelijk dat de omzet ook laag is zodat omzet alléén niet voldoet als criterium om selectie met betrekking tot het wel of niet beheersen met behulp van plannings van de onderhoudsbeurten uit te voeren.

De *levertijd* is voor verschillende aspecten van de beheersing van belang.

In de eerste plaats is het om enig nuttig effect te kunnen verkrijgen – vergeleken bij bijvoorbeeld Statistic Inventory Control – noodzakelijk, dat de levertijd korter is dan de tijdsduur, die aanwezig is, tussen het tijdstip waarop voorspelling plaatsheeft en het planningstijdstip van de onderhoudsbeurten.

Immers is de levertijd langer dan bovengenoemde tijdsduur, dan is het onmogelijk om met plannings rekening te houden. Hieruit blijkt tegelijk het belang van de planninghorizon van de onderhoudsbeurten.

Ten tweede is de levertijd van belang wanneer men bepaalt hoeveel onderdelen men op voorraad moet leggen, als de vraag te laag is om statistische voorspelmethoden te gebruiken. Naarmate de levertijd langer is, zijn de kosten van buitenvoorraad-raken hoger en zal men geneigd zijn meer stuks van het onderdeel op voorraad te leggen.

Ten derde speelt de variatie in de levertijd een rol bij het bepalen van de grootte van de veiligheidsvoorraad voor het onderdeel. Immers als de variatie groot is zal men, bij een gelijke kans op buiten-voorraad-raken, een grotere veiligheidsvoorraad nodig hebben.

Dit geldt zowel voor voorraadbeheersing met gebruikmaking van plannings, als voor statistische voorraadbeheersingsmethoden.

– *Beargumentatie van de beslissingsmomenten (deel I)*

Een aantal beslissingspunten komen meermalen voor. In dat geval wordt verwezen naar de eerste maal dat de bij het punt behorende vraag wordt toegelicht. Voor de vragen zelf en de samenhang ervan wordt verwezen naar het beslissingschema (zie figuur 1).

Onderstande getallen verwijzen naar de beslissingsmomenten in het schema.

Ad 1: Als er voor het beschouwde onderdeel geen vraag optreedt als gevolg van geplande onderhoudsbeurten dan is gebruikmaking van planningen van beurten onmogelijk.

Ad 2: Bij een zeer lage vraag is de kans op optreden van vraag niet voldoende nauwkeurig af te leiden uit historische gegevens. Als (extreem) voorbeeld kan hierbij een onderdeel worden opgenomen waarvoor tot op heden geen vraag naar is opgetreden. Het is vrijwel zeker dat gedurende de levensduur van de materieelserie de kans op storing van, en dus vraag naar, het onderdeel groter dan nul is.

Ad 3: Bij een lage prijs van het onderdeel is de investering in een voorraad voor de gehele levensduur zo laag dat men geen inspanning moet gaan steken in moeilijke overwegingen over de optimale voorraad. Een grove schatting is voldoende voor de vraag gedurende de gehele levensduur.

Ad 4: Om een langzaamlopend reservedeel aldan niet op te nemen in de voorraad moeten deskundigen de volgende factoren tegen elkaar afwegen:

- de prijs, ofwel de hoogte van de investering;
- de kans op storing, deze is bij risicodelen zeer moeilijk in te schatten;
- de penalty costs, dit zijn de kosten van een onderdeeltekort.

Dit zijn de kosten die optreden door een niet of verminderde beschikbaarheid van het materieel, ook wel de essentialiteit genoemd, het al of niet aanwezig zijn van de mogelijkheid van (provisorische) reparatie en de extra kosten ten gevolge van een spoedbestelling.

Ad 5: Als de levertijd groter is dan de planninghorizon kan er niet op planningen worden geanticipeerd en is gebruikmaking onmogelijk van beurtenplanningen.

Ad 6: Zie ad 2.

Ad 7: Zie ad 3.

Ad 8: Zie ad 4.

Ad 9: Het doorrekenen van de behoeften aan de hand van de beurtenplanningen is een bewerkelijke en daarom relatief kostbare zaak. Als de prijs van een artikel laag is moet men geen dure methode hanteren voor de beheersing van de voorraad van dat artikel. Als de vraag laag is bij een lage prijs moet men eenvoudigweg zorgen dat er voldoende voorraad aanwezig is. Als de vraag hoog is, zal deze met zeer grote waarschijnlijkheid statistisch redelijk zijn te voorspellen en zal gebruikmaking van planningen niet noodzakelijk zijn. Is de prijs hoog dan is een zo laag mogelijke voorraad belangrijk en daarom gebruikmaking van planningen nuttig.

Ad 10: Zie ad 2.

Ad 11: Zie ad 3.

Ad 12: Zie ad 4.

Ad 13: Bij een gelijkmatige vraag hieronder wordt in dit verband verstaan een vraag die voldoende groot is en een kleine spreidingscoëfficiënt heeft – levert gebruikmaking van planningen nauwelijks voordelen op in de vorm van minder voorraad en minder tekorten. Daarom wordt er in dat geval voor SIC (E: Statistical Inventory Control), als beheersingscategorie gekozen, met daarbij de aantekening dat het onderdeel moet worden voorzien van een kenmerk. Dit kenmerk geeft aan dat de karakteristieken van de vraag regelmatig, bijvoorbeeld elk kwartaal gecontroleerd moeten worden. Er moeten grenzen worden aangegeven waarbinnen zowel vraagniveau als spreiding mogen variëren.

Als er een grens wordt overschreden moet signalering hiervan plaatsvinden. De reden hiervan is dat verschuivingen, of andere veranderingen in de plannen, het vraagpatroon sterk kunnen beïnvloeden waardoor statistische voorraadbeheersing ontoereikend zou kunnen worden.

Na beslissingsmoment 13 (zie figuur 1 blad 2) moet allereerst een analyse plaatsvinden van het deel van de vraag dat afhankelijk is van planningen. Dit wordt in de volgende paragraaf beschreven. De resterende beslissingsmomenten zullen later worden beargumenteerd.

– Analyse van het deel van de vraag dat optreedt als gevolg van geplande onderhoudsbeurten

Bij de deterministisch voorspelbare vraag – dat is de vraag die voortkomt uit onderhoudsbeurten – dient voor het beschouwde onderdeel per type onderhoudsbeurt te worden onderzocht, of gebruikmaking van beurtenplanningen met grote waarschijnlijkheid voordeel oplevert, ten opzichte van het gebruik van statistische methoden. Is dit niet het geval dan is het niet zinvol om de extra inspanning te verrichten, die gebruik van planningen vraagt voor die typen onderhoudsbeurten.

Als uitgangspunt wordt de totale gemiddelde vraag per periode genomen. Deze is opgebouwd uit: een deterministisch voorspelbaar gedeelte en een stochastisch voorspelbaar deel.

Voor elk type onderhoudsbeurt waarvoor het voordeel van het gebruik van planningen niet waarschijnlijk is, moet de daaruit voortvloeiende gemiddelde vraag per maand worden afgetrokken van het deterministisch te voorspellen gedeelte en bij het stochastisch te voorspellen deel worden opgeteld.

Zo wordt de vraag die in aanmerking komt om beheerst te worden met behulp van planningen afgezonderd.

De vraag naar het beschouwde onderdeel, voortvloeiend uit een geplande onderhoudsbeurt, wordt van het deterministisch te voorspellen gedeelte van de vraag naar het onderdeel afgetrokken, indien:

- de gemiddelde vraag, per onderhoudsbeurt van dat type erg klein is. In dat geval is namelijk de voorspellende waarde van de beurtenplanning klein.

Als voorbeeld kan worden genomen een kans op verbruik per beurt van $1/20$. Als men dan bijvoorbeeld 20 beurten heeft in twee jaar dan is de vraag volgend uit die beurt 1 exemplaar.

Het is nauwelijks zinvol hiermee rekening te houden aangezien men niet weet wanneer die vraag op zal treden.

Onderdelen met een zeer lage totale gemiddelde vraag moeten echter worden uitgezonderd.

- de tussenaankomsttijd van de beurten van een bepaald type, dit is de tijdsduur die gemiddeld tussen 2 beurten verstrijkt, te klein is. Naarmate de tussenaankomsttijd kleiner is, zal de vraag meer een stochastisch patroon benaderen, waarbij op elk moment vraag kan optreden, en daarom wordt gebruik van planningen minder interessant. Hierbij is een gelijkmatige beurtenplanning – hiermee wordt een kleine spreidingscoëfficiënt van de tussenaankomsttijd bedoeld – een voorwaarde.

- de spreidingscoëfficiënt van de vraag, voortvloeiend uit een bepaald type onderhoudsbeurt, groot is en bovendien het aantal uit te voeren beurten klein is. Immers in dat geval is er moeilijk te voorspellen, hoeveel exemplaren van het artikel nodig zullen zijn voor de bewuste beurten.

Zeker initieel zal het moeilijk zijn om redelijke schattingen van bovenstaande variabelen te verkrijgen, en moet men hierbij proberen schijnbare nauwkeurigheden te vermijden.

- *Beargumentatie van de beslissingsmomenten (deel II)*

Ad 14, 15 en 20: De grootte van de fractie van de gemiddelde vraag per periode, die deterministisch is te voorspellen, is bepalend voor de combinatie van beheersingsmethoden die moeten worden gebruikt.

Is de volledige vraag deterministisch te voorspellen (20), dan is gebruik van planningen alleen voldoende. Als een vraag niet meer deterministisch is te voorspellen dan moet men een andere methode toevoegen.

Is de stochastisch te voorspellen fractie klein, dan kan met een toeslag op het deterministisch te voorspellen verbruik worden volstaan (14 en 20).

Is de stochastisch te voorspellen fractie aanzienlijk (14 en 15) dan is de keuze van de beheersingsmethode voor het niet-deterministisch gedeelte afhankelijk van de grootte ervan. Deze wordt bij beslissingsmoment 19 onderzocht. Als de deterministisch te voorspellen fractie klein is (14 en 15), dan kan men deze verwaarlozen en de vraag beheersen als ware hij stochastisch. Deze moet dan aan dezelfde beslissingsmomenten worden onderworpen, als ook gebeurt in paragraaf 5. 3 bij stochastisch voorspelbare vraag.

Ad 16: Zie ad 2.

Ad 17: Zie ad 3.

Ad 18: Zie ad 4.

Ad 19: Als het stochastisch te voorspellen deel van de vraag in aantallen gezien erg klein is, dan is voorspelling hiervan met behulp van statistische methoden een moeizame zaak. Dit is reeds beschreven in paragraaf 5. 3 (onder ad 2). Nu er daarnaast een deterministisch deel is, zijn er geen moeilijke afwegingen nodig en heeft men genoeg aan een kleine toeslag.

Is het stochastisch gedeelte van de vraag wel groot genoeg, om met behulp van modellen te beheersen, dan wordt dit deel met behulp van statistische methoden beheerst.

– De beheersingscategorieën

Alle routes in het beslissingsschema monden uit in een beheersingscategorie. Hierna enige toelichting op deze categorieën.

Statistical Inventory Control (SIC) duidt een groep van methoden aan, waarbij men met behulp van statistische wetmatigheden voorraden beheerst. Binnen SIC zijn er allerlei variaties³ mogelijk.

Bij *incidenteel bestellen* (IB) worden een, twee of drie stuks van het reservedeel op voorraad gelegd. Bij het optreden van vraag wordt telkenmale opnieuw bekeken of er één of meer stuks zullen worden bijbesteld.

Bij *op order bestellen* (OO) wordt geen voorraad van het onderdeel aangelegd; uitsluitend bij het optreden van vraag wordt het onderdeel besteld. Er wordt onderscheid gemaakt tussen *op order bestellen* en *risicovoorraad aanleggen*. Als methode zijn deze categorieën niet wezenlijk verschillend; op order bestellen kan immers worden gezien als risicovoorraad van nul stuks.

De consequenties verschillen echter dusdanig, dat het onderscheid toch essentieel wordt geacht.

Met *gebruikmaking van planningen* (P) wordt een toepassing van de time-phased orderpoint techniek aangeduid. Hierbij worden de planningen van – in casu – onderhoudsbeurten gebruikt om de tijdstippen te bepalen, waarop de voor die beurten benodigde onderdelen moeten worden besteld.

Planningen plus toeslag (P + T) en *planningen plus Statistic Inventory Control* (P + SIC) vallen ook onder deze beheersingscategorie. Een verdere uitwerking hiervan maakt geen deel uit van dit artikel.

5. De voor het beslissingsschema benodigde gegevens

Om de vragen die in het beslissingsschema beheersingscategorieën worden gesteld te kunnen beantwoorden, moet voor een reservedeel een aantal *gegevens* worden geregistreerd en eventueel moeten met behulp daarvan bepaalde *variabelen* worden berekend.

Om het onderdeel te kunnen identificeren moet hieraan een *code nummer* zijn toegekend. Bij NS is een artikel-codering in gebruik die ook binnen het voorraadbeheersingssysteem ADVOMA gebruikt wordt.

Voor de vraag naar het reservedeel moeten *periodecijfers* berekend zijn. Hiervoor kan dan een gemiddelde, een spreiding en een spreidingscoëfficiënt worden berekend ($m = \text{gem. vraag/periode}$; $s/m = \text{spreidingscoëfficiënt}$). De lengte van de termijn, waarover deze periodecijfers van de vraag moeten zijn berekend is afhankelijk van de grootte van de vraag. Bij langzaamlopende artikelen is het zinvol om de volledige historie van de vraag te bewaren; bij snellopende artikelen heeft men voldoende aan de periodecijfers van drie à vier jaar.

Ook de *prijs* van het onderdeel moet bekend zijn. Hiervoor kan, voorzover het slijtdelen betreft, de *verrekenprijs* uit het ADVOMA-systeem worden gebruikt. Wisseldelen worden in het schema niet beschouwd vanwege versturende invloeden ($p = \text{verrekenprijs}$)

Het is noodzakelijk de *levertijd* van het onderdeel te kennen.

De levertijd moet de interne plus de externe levertijd omvatten. Bovendien moet de spreiding van de levertijd bekend zijn. De besteltermijn (BT), die bijvoorbeeld in ADVOMA wordt gehanteerd, bestaat uit de (interne) besteltijd, plus de (externe) levertijd, plus de keurings- en innametijd. Daarbij is een veiligheidsfactor gevoegd, die voor slow-movers groter is dan voor fast-movers.

De spreiding van de gerealiseerde levertijden wordt in ADVOMA niet berekend. Er vindt wel een registratie van de realisaties op de besteltermijn en de externe levertijd plaats. Voor de externe levertijd wordt bovendien de afwijking geregistreerd.

(l = levertijd)

De *planninghorizon* kan worden afgeleid van de begrotingen. Deze bevatten namelijk een globale beurtenplanning, in de vorm van het aantal beurten dat per maand per type dient te worden uitgevoerd en zijn minimaal over de twee komende jaren bekend.

(h = *planninghorizon*)

Daarnaast moeten ook de *beurtinhouden*, met daarbij de voorgeschreven *vervangingen*, bekend zijn; en moeten er schattingen zijn gemaakt voor de vraag naar onderdelen voor het toestands-afhankelijk onderhoud, dat deel uitmaakt van de beurt. Immers zonder dit is gebruikmaking van planningen voor de voorraadbeheersing onmogelijk.

Deze gegevens moeten vastgelegd worden in *stuklijsten*.

Voor een deel van de onderhoudsbeurten zijn *standaardlijsten* aanwezig, waarop de voorgeschreven vervangingen staan vermeld. Voor het toestandsafhankelijk onderhoud worden momenteel nog geen schattingen gemaakt. Al deze gegevens moeten aanwezig zijn om te kunnen plannen en dus om de *planninghorizon* te kunnen bepalen. Daarnaast zijn deze gegevens nodig om te bepalen of het onderdeel bij onderhoudsbeurten wordt gebruikt, hetgeen bij het eerste beslissingsmoment wordt gevraagd.

Ook bij de analyse van de vraag die optreedt als gevolg van geplande onderhoudsbeurten, heeft men de begroting nodig van de onderhoudsbeurten alsmede *standaardlijsten* en schattingen van de vraag.

Voor een bepaald codenummer (onderdeel) moet per geplande onderhoudsbeurt, waarbij vraag naar dat codenummer optreedt, het gemiddelde en de spreidingscoëfficiënt van de vraag per beurt worden berekend.

Voor voorgeschreven vervangingen is bepaling van gemiddelde en spreidingscoëfficiënt eenvoudig. Bij toestandsafhankelijk onderhoud kan men uitgaan van ervaringscijfers van de beurt. Deze kunnen worden verkregen met behulp van lijsten van de reeds per type verrichte beurten.

Daarnaast moeten voor elke verrichte beurt de gevraagde onderdelen worden geregistreerd.

Momenteel wordt er nog geen gemiddelde of spreidingscoëfficiënt van de uitgifte per beurt berekend.

De *deterministisch te voorspellen fractie van de vraag* naar 'n onderdeel dient berekend te worden door met behulp van planningen van onderhoudsbeurten en berekeningen c. q. schattingen van de vraag die daarbij op zal treden, de gemiddelde

deterministisch te voorspellen vraag per periode te bepalen en de verhouding tot de gemiddelde totale vraag per periode te bepalen.

(fd = *deterministisch te voorspellen fractie van de vraag*)

De omvang van de *gemiddelde stochastisch te voorspellen vraag* per periode kan worden berekend door van de gemiddelde totale vraag per periode de gemiddelde deterministisch te voorspellen vraag per periode af te trekken (vs = *gemiddelde stochastisch te voorspellen vraag / periode*).

Literatuur

1. Prof. Ir. W. M. J. Geraerds. *Towards a Theory of Maintenance*. The Organisation of Logistic Support Systems, session 4 1972.
2. Prof. Ir. W. M. J. Geraerds. *Typische aspecten van de voorraadbeheersing in het onderhoud*. NVDO-rapport, 1982-nr. 2.
3. Ir. R. N. van Hees en Prof. Ir. W. Monhemius. *Productiebesturing en Voorraadbeheer*. Kluwer-Deventer 1970.
4. W. A. Masselink. *Voorraadbeheersing van slijtdelenartikelen in de Im-magazijnen*. Rapport van de NV Nederlandse Spoorwegen, St & O/o. r. /1. (241)BB, 1979.
5. R. M. J. Niëns. *Classificatie van Onderhoudsdelen*. Literatuurstudie KBS, TUE. Eindhoven, december 1982.

Model:

Analyse van het deel van de vraag dat optreedt als gevolg van geplande onderhoudsbeurten.

Codenummer:

A. de gemiddelde vraag per type onderhoudsbeurt $mb < 0,25$?

T 10130.....	mb =
T 10154.....	mb =
B 4410100 / B 4410110	mb =
B 4410103 / B 4410113	mb =
B 4410104 / B 4410114	mb =

B. de interaankomsttijd per type onderhoudsbeurt < 1 week ?

T 10130.....	i.a.t. =
T 10154.....	i.a.t. =
B 4410100 / B 4410110	i.a.t. =
B 4410103 / B 4410113	i.a.t. =
B 4410104 / B 4410114	i.a.t. =

C. de spreidingscoëfficiënt van de vraag per type onderhoudsbeurt $sb/mb > 3$?

T 10130.....	sb/mb =
T 10154.....	sb/mb =
B 4410100 / B 4410110	sb/mb =
B 4410103 / B 4410113	sb/mb =
B 4410104 / B 4410114	sb/mb =

Indien A, B of C geldt:

de vraag van de deterministisch te voorspellen vraag aftrekken (volgens begroting), en bij de stochastisch te voorspellen vraag op te tellen.

deterministisch te voorspellen vraag =

stochastisch te voorspellen vraag =

deterministisch te voorspellen fractie =

Voorraadbeheersing van risicodelen in de zeescheepvaart

22

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. Th.H.W. Janssen en samengevat en bewerkt door ing. E.J.L. Lamberti

1. Inleiding

Het onderwerp van het onderzoek is de voorraadbeheersing van reserveonderdelen voor zeeschepen, en dan met name de langzaam muterende dure reserveonderdelen, risicodelen genoemd.

Het afstudeeronderzoek had tot doel te komen tot een voorraadbeheersingssysteem voor deze risicodelen, maar tijdens de uitvoering bleek dat hiervoor meer gegevens noodzakelijk waren dan op dat moment waren te achterhalen. Met name naar de extra uitgaven, die het ontbreken van een reserveonderdeel, met zich mee kunnen brengen, lijkt meer onderzoek gewenst. Een en ander is ten koste gegaan van een uitgebreide kwantitatieve benadering van de probleemstelling.

De uiteindelijke opdrachtformulering van de afstudeeropdracht luidt:

Vershaf inzicht in de antwoorden op de volgende vragen:

- Welke plaats nemen de risicodelen (i. e. de reservedelen met een lage tot zeer lage verbruiksfrequentie) in, in de totale voorraad ?
- Waar kunnen deze risicodelen het best worden opgeslagen ?
- Is het mogelijk het aantal risicodelen op een verantwoorde wijze te verminderen, en zo ja, wat zijn de mogelijke besparingen ?

De bestaande voorraad reserveonderdelen wordt opgesplitst in drie categorieën (verbruiks-, wissel- en risicodelen), omdat elk van deze categorieën een eigen aanpak vereist. Ook wordt die categorie reserveonderdelen geïdentificeerd, die het feitelijk onderwerp vormt van het onderzoek.

Beschreven wordt het totstandkomen van een risico-schaal: een lijst van de mogelijke gevolgen van het ontbreken van een reserveonderdeel aan boord van een schip en gerangschikt naar toenemend missie-effect. Deze risicoschaal zal van

aanzienlijke invloed blijken te zijn op de beslissing over de plaats waar risicodelen op voorraad worden gelegd.

Er wordt een beslissingsschema gepresenteerd dat tot stand is gekomen op grond van in hoofdzaak kwalitatieve overwegingen en heeft voornamelijk betrekking op de plaats waar risicodelen op voorraad moeten worden gehouden. De implicaties van het beslissingsschema op de bestaande boordvoorraden komen aan de orde.

2. Afstudeeropdracht en aanpak

De aandacht voor rationalisering van de bedrijfstak scheepvaart is de afgelopen jaren gegroeid, naarmate de economische recessie een grotere invloed kreeg op de Nederlandse koopvaardij. Zowel individuele rederijen, als overkoepelende organisaties, starten onderzoeken naar besparingsmogelijkheden op allerlei gebieden.

Een van die gebieden is de voorraadbeheersing van reserveonder derdelen aan boord van schepen.

- *Lopende onderzoeken op gebied van voorraadbeheersing van reserve-onderdelen in de zeescheepvaart*

In 1981 is men begonnen met een onderzoek naar de gebruiksmogelijkheden van microcomputers aan boord van schepen onder andere ten behoeve van de voorraadbeheersing. Verwacht werd met de invoering van dergelijke apparatuur de hoeveelheid administratie aan boord sterk te verminderen.

Een tweede onderzoek op het gebied van voorraadbeheersing in de scheepvaart dat werd verricht is het deelproject 'Voorraadbeheer', een onderdeel van het project onderhoudsbeheersing.

Het project *Onderhoudsbeheersing* omvat vijf deelprojecten te weten:

- onderhoudsplanning
- voorraadbeheer
- arbeidsplanning
- kostenbeheer
- nieuwbouwplanning.

Na het afsluiten van het deelproject 'onderhoudsplanning' werd (in 1981) het tweede deelproject *voorraadbeheer* gestart. De doelstelling van dit deelproject werd geformuleerd als:

'het ontwikkelen en uitwerken van een goed hanteerbaar administratief systeem, zodat een doorzichtig en zo rationeel mogelijk reserveonderdelenbeheer kan worden opgezet'.

– *De probleemstelling*

Volgens een oorspronkelijk geformuleerde opdracht zou het afstudeeronderzoek antwoord moeten geven op de volgende vragen:

- welke voorraadpunten komen in aanmerking voor het in voorraadhouden van reservedelen voor een schip ?
- moet men wel reservedelen op voorraad houden ? Zo ja, welke onderdelen houdt men waar op voorraad; zo nee, hoe moet een schip in geval van een storing worden bevoorrad ?
- indien voorraden worden aangehouden, wanneer en hoe moeten deze worden aangevuld ?
- welke informatie is nodig bij het voorraadproces; hoe wordt deze op efficiënte wijze verkregen en verwerkt ?

In feite worden in deze opdracht twee onderzoeken omschreven. De eerste drie punten slaan op de voorraadbeheersing van reserve-onderdelen van schepen; het laatste punt houdt in het ontwerpen van een informatiesysteem hiervoor.

Men kan het informatiesysteem echter pas ontwerpen indien het onderliggende probleem, de voorraadbeheersing, is opgelost.

Het laatste punt, informatie nodig bij het voorraadproces en ontwikkelen van een informatiesysteem, zal in het onderzoek buiten beschouwing blijven; het opzetten van een voorraadbeheersingssysteem voor reserveonderdelen voor schepen wordt daarmee een herziene opdrachtformulering.

Binnen het totale assortiment reserve-onderdelen kan men verschillende klassen onderscheiden:

- artikelen met een (regelmatig) hoog verbruik
 - artikelen met een (onregelmatig) laag tot zeer laag verbruik
- Voor de artikelen met een hoog verbruik kan men bekende voorraadtheorieën hanteren bijvoorbeeld SIC (E:Statistical Inventory Control), waarmee deze problematiek is opgelost.
- De artikelen met een laag verbruik kan men verder nog onderverdelen in:
- repareerbare artikelen
 - niet-repareerbare artikelen.

Uit een literatuurstudie¹⁰ bleek dat voor de beheersing van deze laag-verbruik-artikelen slechts in enkele gevallen bevredigende oplossingen zijn gevonden. Een algemeen toepasbare beheersingsmethode is er (nog) niet. Mede om die reden vormen deze artikelen een interessant afstudeeronderwerp. Ook bij de opdrachtgever bestond grote interesse voor een beheersing van de niet-repareerbare artikelen met een lage vraag (in het vervolg genoemd *risico-delen*). Derhalve werd besloten het afstudeeronderzoek te richten op de categorie risicodelen.

Teneinde een mogelijke aanzet tot een oplossing voor het probleem, dat de beheersing van risicodelen voor schepen vormt te kunnen geven, dienen de volgende vragen te worden beantwoord:

- hoe is de bestaande situatie met betrekking tot de voorraad reserveonderdelen aan boord van een schip ?
- welke artikelen zijn de risicodelen, en waarom worden deze artikelen in voorraad genomen ?
- wat zijn de mogelijke consequenties van het ontbreken van een risicodeel ?
- welke risicodelen moeten in voorraad worden gehouden, in welke aantallen, en welke voorraadpunten komen daarvoor in aanmerking ?
- wat zijn de mogelijke besparingen op het gebied van risico delen ?

3. Effectiviteit van de bestaande boordvoorraad

Aanvankelijk berustte het deelproject *voorraadbeheer* op meningen, indrukken en schattingen. Het betreft hier onder meer de volgende schattingen verstrekt door medewerkers van Technische Dienst en Vlootbeheer van diverse rederijen tijdens een workshop op 3 en 4 februari 1981:

- aantal artikelen aan boord 5.000 à 6.000 - waarde van deze artikelen in gulden f 1.000.000, - renteverlies (op in voorraad geïnvesteerde) f 250.000 pj
- verhouding courante/incourante voorraad 1 op 10
- aankopen courante voorraad per jaar f 30.000, - .

Teneinde meer betrouwbare gegevens te verkrijgen werden twee onderzoeken uitgevoerd:

- het achterhalen en analyseren van gegevens over een boord voorraad reserveonderdelen;
- de effectiviteit van de bestaande boordvoorraden; met andere woorden: in hoeverre voldoet het in voorraad gehouden assortiment reserve-onderdelen aan het doel, waarvoor dit assortiment is aangeschaft.

Dit doel is tweeledig:

- het beperken van de wachttijden als gevolg van een technische storing. Hierbij speelt zowel de veiligheid van schip, lading en bemanning een rol (stilstaan op zee); alsook economische motieven (niet kunnen vertrekken uit haven, eventuele sleepkosten).
- het voldoen aan de eisen gesteld door de classificatiebureau's. Dit zijn de verzekeringsinstanties voor de rederijen.

Het onderzoek is beperkt tot Grote Handelsvaart schepen. Teneinde een representatieve steekproef van de nederlandse GHV-vloot te verkrijgen zijn 29 schepen (= 15% van de nederlandse GHV-vloot) bij het onderzoek betrokken. De verdeling over de scheepstypen is als volgt:

- 4 roll-on, roll-off schepen

- 5 containerschepen
- 4 multi purpose carriers (MPC)
- 5 conventionele vrachtschepen
- 3 droge bulk schepen
- 4 produkten tankers
- 2 very large crude carriers (VLCC)
- 2 gastankers.

Het eenvoudigst te onderzoeken was het feit of het assortiment reservedelen voldeed aan de eisen van de classificatiebureau's

Deze bureau's verplichten de rederijen tot het in voorraadhouden van reserves voor nauwkeurig omschreven onderdelen van de technische installaties aan boord. Elke nederlandse rederij houdt zich strikt aan deze voorschriften omdat hun schepen anders niet verzekerd zijn en in dat geval ook niet onder nederlandse vlag mogen varen.

Om te onderzoeken of het assortiment aan boord ook voldoet aan de eerste eis - het reduceren van de wachttijden - zijn alle havenrapporten (waarin registratie van de anker- en afmeertijden) van voornoemde 29 schepen bestudeerd, en is elke geregistreerde stilligtijd opgetekend uit de periode januari 1978 tot en met december 1980. Deze stilligtijden werden onderscheiden in: stilligtijden in een haven en stilligtijden op zee, beiden niet volgens de planning.

Voor dit afstudeeronderzoek zijn alleen die stilligtijden interessant, die veroorzaakt zijn door een tekort aan reserveonderdelen. Ook werd, voor zover mogelijk, de oorzaak van het stilliggen vastgesteld en de functie van het schip waarvan de storing tot stilliggen leidde.

De vier hoofdfuncties van het schip zijn:

- de transportfunctie, hieronder valt alles dat met de voort stuwing verband houdt
- laden en lossen, storingen in de laad- en losfunctie hebben voornamelijk betrekking op dekkranen en heckramp
- protectie, deze functie omvat de bescherming van schip, lading en bemanning
- voorzieningen bemanning, deze functie voorziet in de leefbaarheid aan boord.

De (voor het afstudeeronderzoek belangrijkste) conclusie die uit de gegevens volgt is dat van de in totaal 3.200 geregistreerde stilligtijden, slechts een half uur is veroorzaakt door het ontbreken van en wachten op een reserveonderdeel (= 0,02 %).

Er zij op gewezen dat uitsluitend het oponthoud als gevolg van technische oorzaken is onderzocht. Wachttijden die het gevolg zijn geweest van organisatorische problemen zijn dus niet meegerekend. Ook de eventuele overtolligheid van de voorraad werd niet onderzocht in deze fase van het (afstudeer)onderzoek.

Enkele *neven-conclusies* uit het onderzoek naar de stilligtijden zijn:

- de technische beschikbaarheid is zeer hoog (> 99%) en nagenoeg onafhankelijk van het scheepstype
(Met technische beschikbaarheid wordt bedoeld: het percentage uren per jaar, gedurende welke het schip, technisch gezien, in staat is zijn functie te vervullen.)
- de stilligtijden zijn van 1978 tot en met 1980 gestegen terwijl de gemiddelde vaartijd constant is gebleven
- ruim 75% van de stilligtijden wordt veroorzaakt door storingen in de transportfunctie.

De betekenis van dit onderzoek naar de effectiviteit van de bestaande voorraden voor het project, is samen te vatten in twee punten:

- het huidige service-peil van de voorraden is dermate hoog, dat het zeer aanneemelijk is dat de voorraden kunnen worden gereduceerd, en wel op een zodanige wijze dat de service graad niet of nauwelijks wordt beïnvloed;
- het (afstudeer)onderzoek behoeft niet te streven naar een verdere reductie van de (0.02%) stilligtijden.

4. De bestaande boordvoorraad

Een tweede onderzoek naar gegevens over de bestaande situatie betrof de boordvoorraad. Doel van het onderzoek was een antwoord te verkrijgen op de volgende vragen:

- welke onderdelen worden er in voorraad gehouden ?
- welk deel daarvan is voorgeschreven (en waarom) ?
- prijzen, omloopsnelheden, verbruiksfrequenties per onderdeel, etcetera ?

Het onderzoek is verricht naar de boordvoorraad van een multi purpose carrier. Uitgangspunt vormde het zogenoemde reservedelenboek, een losbladig boek, waarin de complete voorraad technische goederen aan boord van het schip is opgenomen inclusief gereedschap en dergelijke (totaal ongeveer 3.600 codenummers).

Naast het codenummer, een combinatie van bladzijde- en regelnummer, is in dit boek opgenomen een omschrijving van het artikel, fabricage- c. q. bestelnummer, de opbergplaats en de minimum- en maximumwaarde waartussen de voorraadhoogte van het artikel zich moet bewegen.

De *eerste* stap: laat al die codenummers, die niet kunnen worden beschouwd als reserve-onderdeel voor de technische installatie aan boord (bijvoorbeeld gereedschap) buiten beschouwing. Er bleven toen nog 2.600 van 3.600 codenummers over.

De *tweede* stap: het verzamelen van prijs- en verbruiksgegevens De verbruikscijfers werden achterhaald uit twee bronnen:

- het nagaan van alle formulieren vanaf nieuwbouw, waarop het schip een aanvraag voor onderdelen indient bij het walkantoor (enkele honderden)
- een inventarisatie van de fysieke voorraad aan boord van het schip.

Het combineren van deze gegevens geeft het reserve-onderdelenverbruik vanaf de nieuwbouw.

De *derde* stap was het onderscheiden van enkele categorieën binnen het totale assortiment reserve-onderdelen, omdat verschillende categorieën reserve-onderdelen een verschillende aanpak vragen.

De scheiding tussen de categorieën is zuiver arbitrair; de categorie materialen is buiten beschouwing gelaten. Voor de overige categorieën werd gekozen voor drie klassen en worden de volgende definities gehanteerd:

verbruiksdelen: onderdelen die meer dan eens per tien jaar gebruikt worden en op technische of economische gronden niet in aanmerking komen voor reparaties;

wisseldelen: onderdelen die na gebruik gerepareerd worden en derhalve de kringloop installatie – werkplaats- magazijn – installatie doorlopen;

risicodelen: onderdelen die hooguit eens per tien jaar worden gebruikt en die op technische of economische gronden niet in aanmerking komen voor reparatie.

De term *risicodelen* behoeft enige verduidelijking. Indien deze term in de literatuur wordt gebruikt doelt men meestal op de zogenoemde ‘*insurance-type* artikelen’. Dit zijn artikelen die qua verbruik helemaal niet voor voorraadvorming in aanmerking zouden komen (vanwege het verwachte zeer lage verbruik gedurende de totale gebruikstijd van het produktiemiddel), ware het niet dat zij zeer essentieel zijn voor het ‘functioneren’ van het produktiemiddel en zeer lange levertijden en/of zeer hoge uitgaven zullen veroorzaken, indien tot herbevoorrading moet worden overgegaan, na het afbreken van de produktielijn bij de leverancier¹.

In de definitie van risicodelen is het ‘verwachte zeer lage verbruik’ van Brackel, gekwantificeerd als zijnde een verbruik van hoogstens één in de tien jaar.

De verdeling van het assortiment over de drie klassen berust op subjectieve schattingen van de verbruiksfrequenties van de onderdelen door werktuigkundigen, bekend met de installaties.

Als *vierde en laatste* stap (voor zover het de bestaande voorraad betreft) gebruik de ABC-analyse. Door middel van een ABC-analyse is men in staat het totale

assortiment op te splitsen in groepen (meestal drie, te weten: A, B en C-artikelen) en kan men het relatieve belang van de artikelen binnen het assortiment bepalen.

Er zijn twee soorten ABC-analyses:

- a. op basis van de verbruikscijfers
- b. op basis van het in de boordvoorraad geïnvesteerde vermogen (op basis van de prijzen van de codenummers).

In dit geval zou men de geschatte verbruikscijfers van een multi-purpose carrier moeten gebruiken om een gemiddelde jaarlijkse verbruikswaarde te berekenen.

Bijvoorbeeld:

Zuiger hoofdmotor, bovenstuk. Prijs f 17.850, -. Geschat verbruik $1/20$, (dat wil zeggen eens in de 20 jaar)

Gemiddelde jaarlijkse verbruikswaarde $1/20 f$ 17.850 = f 892,50

Deze ABC-analyse toont, dat slechts een zeer klein percentage van het aantal artikelen, het grootste deel van het jaarverbruik in gulden veroorzaakt. Juist de risicodelen, waarop het onderzoek zich wil concentreren, komen door een zeer laag verbruik niet of nauwelijks in dit percentage voor en derhalve is de ABC-analyse in dit kader niet geschikt.

De tweede vorm van de ABC-analyse biedt meer perspectief. Hieruit blijkt dat een zeer klein percentage van het aantal codenummers het grootste deel vormt van de waarde van de totale voorraad reserveonderdelen. Juist in dit kleine percentage zullen de, veelal zeer dure, risicodelen zich bevinden.

Vanzelfsprekend zijn de wisseldelen niet in de ABC-analyse opgenomen.

Conclusies:

- Aan boord liggen 2.600 codenummers met een totale waarde van f 1.347.000, -. Van dit bedrag is ongeveer een derde deel voorgeschreven door de classificatie bureau's.

Hiermee vervalt het in rederskringen veel gebruikte argument, dat de voorraad niet kan worden veranderd omdat alles door de classificatie bureau's zou zijn voorgeschreven.

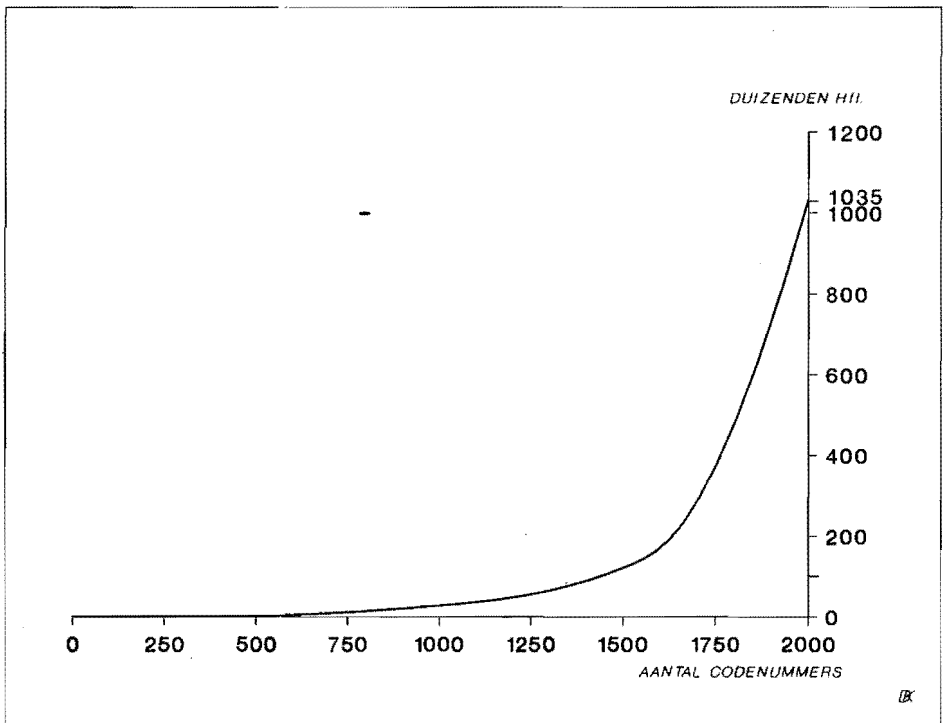
- Ruim 70 % van het aantal codenummers heeft een maximum voorraad ≤ 2
- De boordvoorraad in waarde, aantal codenummers en aantallen stuks per categorie reservedelen, geeft onderstaand beeld:

Tabel 1. Boordvoorraad uitgesplitst naar 3 categorieën

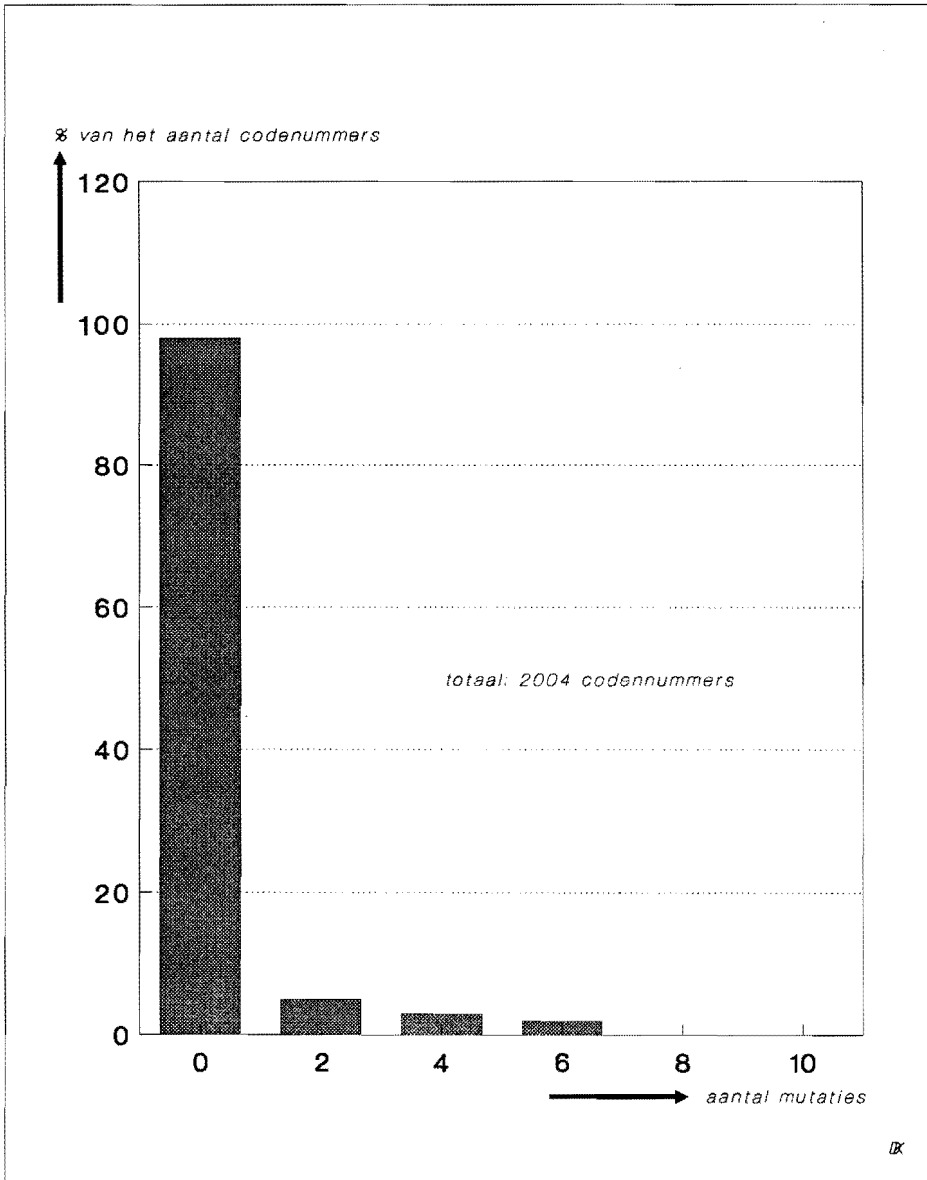
	% v/h aantal codenummers	% v/h aantal stuks	% v/d tot waarde
verbruiksdelen	82	92	32
wisseldelen	1	1	23
risicodelen	17	7	45

Opvallend is dat ongeveer 20% van het aantal codenummers ongeveer 70% van de waarde vertegenwoordigt.

- Er bestaat een groot verschil tussen het gemiddeld jaarverbruik op grond van de historische gegevens (103.000) en het gemiddeld jaarverbruik op basis van de schattingen (176.000). Dit verschil wordt verklaart door het feit dat het hier een vrij nieuw schip betreft. Met de leeftijd van het schip nemen ook de uitgaven voor reservedelen toe.
- De omloopsnelheid van de boordvoorraad (in guldens) is laag, te weten eens per 7,5 jaar (1.347.000 : 175.000).

**Figuur 1.** ABC-analyse op basis van investering (investering = aantal aan boord * stukprijs)

Dit wordt veroorzaakt door het grote percentage codenummers met een klein produkt van (geschatte) verbruiksfrequentie en prijs, zie figuur 2.



Figuur 2. Geschat aantal voorraadmutaties per jaar

Na het verzamelen van gegevens over de bestaande situatie is reeds een vrij duidelijk beeld verkregen van de orde van grootte van de problematiek. Het nut van het afstudeeronderzoek is aangetoond door aannemelijk te maken dat voorraadreductie mogelijk is, terwijl het service-peil kan worden gehandhaafd. In het volgende hoofdstuk zal, met een herziene classificatie, de categorie reserveonderdelen die het onderwerp van het onderzoek vormen, worden geïdentificeerd.

5. Classificatie reserveonderdelen

De classificatie van reservedelen zoals hiervoor gepresenteerd in: *verbruiksdelen, wisseldelen en risicodelen*, bleek enkele nadelen te hebben. De kritiek van met name de rederijvertegenwoordigers spitste zich vooral toe op:

– het onderscheid tussen risico- en verbruiksdelen is zuiver arbitrair. Hoewel dit op zich juist is, blijkt dat de gekozen grenswaarde niet zo bijzonder veel invloed heeft op de categorie-indeling. Een nieuwe berekening, met de grenswaarde voor het geschat verbruik op 1/5, is opgenomen in tabel 2, waarbij vergelijking van belangrijke voorraadgegevens, met grens tussen risico- en verbruiksdeel op een verwacht verbruik van eens per 5 jaar respectievelijk eens per 10 jaar is gelegd.

Hoewel het aantal risicodelen hierdoor sterk toeneemt (200%), neemt de waarde van deze categorie toe met slechts 20%.

De waarde van de onderdelen, voorgeschreven door de classificatie bureau's blijft per categorie nagenoeg gelijk. De aankopen per jaar en de omloopsnelheid voor de 'nieuwe' categorie risicodelen verdubbelen weliswaar, maar in absolute cijfers is deze verdubbeling niet van betekenis.

Tabel 2. Vergelijking voorraadgegevens

	VERBRUIKSDELEN		RISICODELEN	
	grens1/5	grens1/10	grens1/5	grens1/10
codenrs: aantal	1. 282	2. 098	1. 257	441
%	50	81	49	18
stuks: aantal	8. 973	10. 347	2. 179	805
waarde (Hfl)	318. 000	438. 000	717. 000	597. 000
klassevoorschr(Hfl)	21. 000	37. 000	332. 000	316. 000
gemaankopen(Hfl/jr)	63. 000	66. 000	5. 000	2. 000
omloopsnelh. (%/jr)	20%	15%	0. 7%	0. 3%

– Een ander punt van kritiek betrof de wisseldelen.

Men achtte het niet zinvol, ondanks de vaak zeer hoge prijzen van deze onderdelen, het in voorraad houden van deze groep te bestuderen.

Wisseldelen worden om geheel andere redenen aangeschaft dan risico- of verbruiksdelen. Bij de laatst genoemde groepen staan afbreukrisico en gevolgschade centraal, terwijl het bij de wisseldelen draait om de werkefficiëntie.

– Een duidelijk praktisch nadeel was de door de indeling veroorzaakte begripsverwarring. In de rederijwereld hanteert men voor de voorraad reserveonderdelen twee begrippen: *reservedelen* en *gebruiksartikelen*.

Met reservedelen wordt het totaal aan verbruiks-, wissel- en risicodelen bedoeld; de term gebruiksartikelen heeft betrekking op alle technische goederen die niet onder de noemer reservedelen vallen, zoals de grijpvoorraden.

Het gevolg van de nieuwe indeling was dat men de begrippen *verbruiksdeel* en *gebruiksartikel* verwarde. Dit leverde in de praktijk nogal eens problemen op omdat de gebruiksartikelen vallen buiten de verbruiksdelen.

– Het belangrijkste nadeel van de gekozen reservedelenclassificatie is het ontbreken van een prijs criterium. Hierdoor zou de indruk kunnen worden gewekt dat alle reservedelen, ongeacht hun prijs, een gelijke aandacht krijgen.

– *Mogelijkheid tot besparingen*

Het doel van het onderzoek echter is, nagaan van de mogelijkheid tot besparingen op voorraadgebied en vooral met betrekking tot de dure 'slow-moving' reserveonderdelen.

De eventuele besparingsmogelijkheden liggen namelijk op twee gebieden:

– *besparingen op de bevoorradingprocedure*

Hoewel de bevoorradingpolitiek van de verschillende rederijen sterk uiteenloopt, kampen veruit de meeste rederijen met zeer lange administratieve doorlooptijden voor reservedelen-aanvragen (3 à 6 maanden).

Door het onderzoeken van de informatiestromen en het verbeteren van de administratieve procedures wil het deelproject/onderzoek besparingen bewerkstelligen.

– *besparingen op de initiële bevoorrading van een schip*

Dit is het aandachtsveld van het onderzoek. Met dit doel voor ogen ligt het voor de hand dat men zich in eerste instantie richt op dure reserveonderdelen.

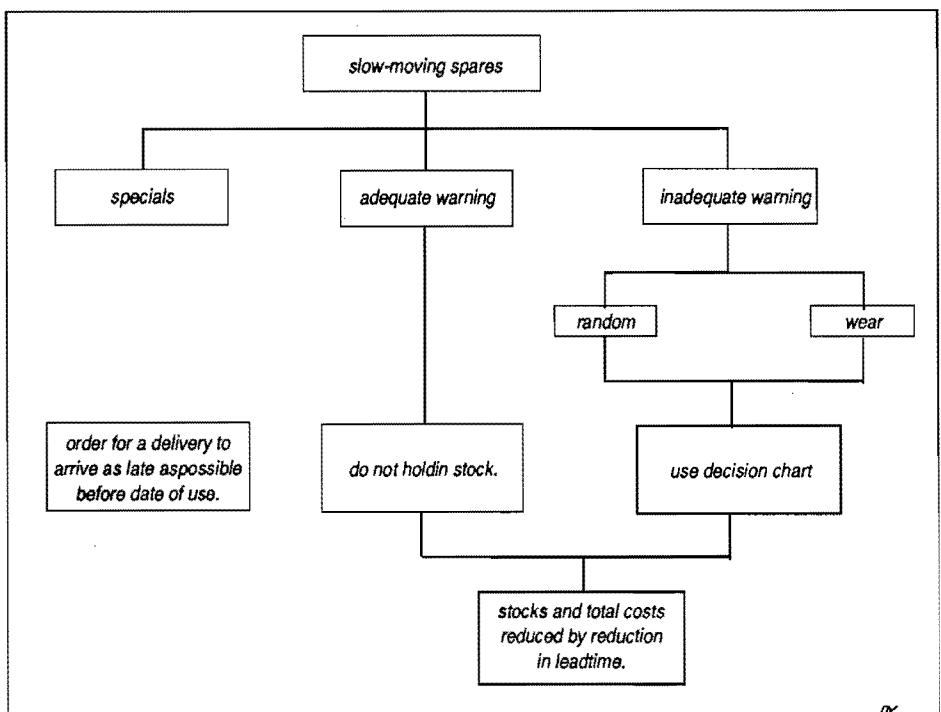
Hieruit blijkt de noodzaak van het opzetten van een reservedelenclassificatie, waarbij de prijs zeker als indelingscriterium een rol dient te spelen.

Neemt men al deze overwegingen in ogenschouw dan is het duidelijk dat de bestaande indeling moet worden herzien.

In de literatuur zijn verschillende reserve-onderdelen-classificaties te vinden. Een bekende classificatie is die van Mitchell¹⁴ die overgenomen is door Harris⁷ en die als volgt rangschikt:

- *Specials*:
onderdelen die gekocht zijn voor gebruik op bepaald tijdstip;
- *Adequate warning items*:
onderdelen waarvan het gebruik uit slijtage valt te voorspellen of onderdelen die snel tijdelijk kunnen worden gerepareerd;
- *True stand-by parts*:
onderdelen waarvan geen-gebruik-gemaakt wordt verwacht en die defect raken op een onvoorspelbaar moment.

Mitchell geeft ook de bijbehorende beheersingsmethoden (zie figuur 3, Classificatie van Slow-movers).



Figuur 3. Classificatie van slow-movers plus aanbevolen beheersmethoden. (Bron: Mitchell)

Gezien de wenselijkheid van een prijs criterium in de op te zetten classificatie is deze methode minder geschikt.

Geraerds⁶ classificeert reserveonderdelen op grond van drie criteria:

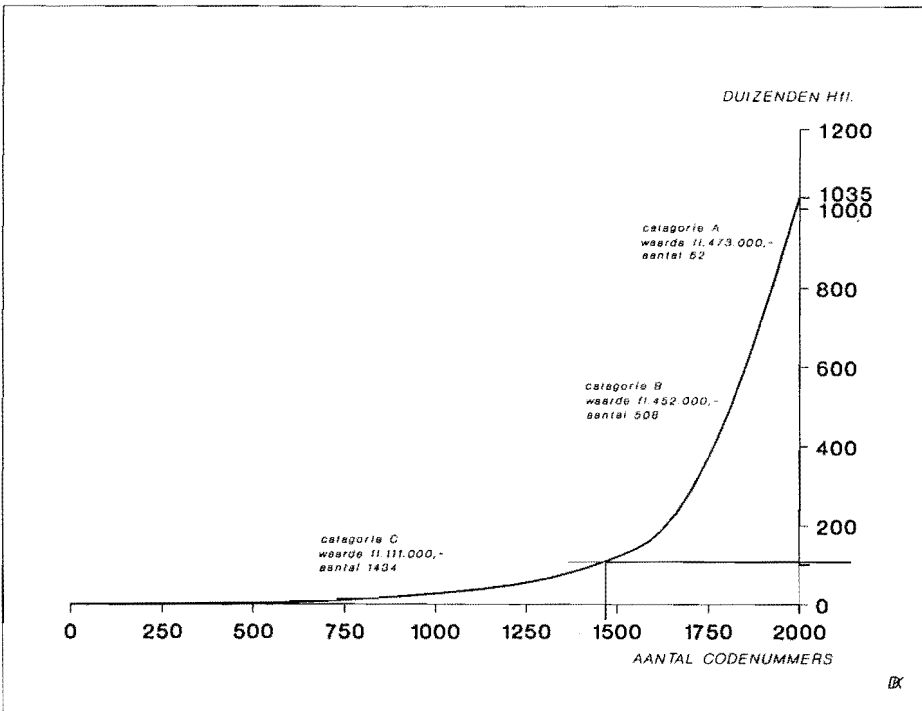
- de vraag (of het verbruik)
- de prijs van het onderdeel
- de specificiteit, waarmee wordt bedoeld het al dan niet standaard zijn van een onderdeel.

Deze classificatie is zeer wel bruikbaar voor de boordvoorraad reserveonderdelen. Zowel het prijs- als het (verwacht) verbruik-criterium zijn opgenomen hierin.

Nu de classificatie-methode is gekozen, rest nog het vaststellen van de grenzen. Een goede basis hiervoor is de reeds gepresenteerde ABC-analyse. Het onderzoek richtte zich op de mogelijkheden tot besparing bij de initiële scheepsbevoorrading en derhalve tevens op de dure reserveonderdelen.

Immers, indien blijkt dat het aantal onderdelen in deze categorie gereduceerd kan worden, dan zal, met elk onderdeel dat niet meer op voorraad wordt genomen, de besparing sterk oplopen.

Voor het vaststellen van prijsgrenzen ligt het derhalve voor de hand om uit te gaan van de ABC-analyse op basis van investering. De overgang van C naar B en B naar A kan men, aangezien de curve (zie figuur 4) geen duidelijke buigpunten vertoont, naar eigen voorkeur kiezen.



Figuur 4. ABC-analyse op basis van investering Indeling in categorieën.

Hier is de keuze als volgt gedaan:

A - artikelen: alle codenummers met een investering $> f\ 2.500,-$

B - artikelen: alle codenummers met een investering tussen de $f\ 250,-$ en $f\ 2.500,-$ gulden

C - artikelen: alle codenummers met een investering beneden de $f\ 250,-$ gulden.

(De aantallen codenummers en de waarden zijn in figuur 4 aangegeven.)

Het onderzoek richt zich nu verder op de dure A-artikelen.

Dit zijn slechts 62 codenummers (3% van het totale aantal code nummers) met een waarde van 473.000,- gulden (46%).

Toch is indeling op basis van investering niet voldoende. De opdracht betreft immers de risico-delen, hetgeen inhoudt dat de verwachte vraag naar een code-nummer zeer laag is.

Investering is gelijk aan prijs per stuk maal het aantal stuks van een codennummer, en verschillende codenummers zijn door een hoog verbruik – en daardoor een grote hoeveelheid aan boord – terecht gekomen in de A-categorie.

Een voorbeeld daarvan zijn de koolborstels. Deze kosten $f\ 40,-$ per stuk maar er zijn 64 stuks aan boord vanwege een hoog jaarverbruik. Een investering derhalve van $f\ 2.560,-$ en dus een A artikel.

Het is duidelijk dat dergelijke onderdelen niet in het onderzoek moeten worden betrokken. Hieruit volgt de noodzaak de A-artikelen te toetsen aan een *tweede* criterium: het verwachte verbruik. Ook hier dient nog een grens te worden bepaald.

Er is reeds aangetoond dat het niet zo een groot verschil oplevert, of men de grens legt bij: eens per vijf jaar, of eens per tien jaar.

Voor de A-artikelen worden de cijfers nogmaals gegeven:

	Aantal	Klassevoorschrift	Waarde
A-artikelen	62	$f\ 284.717$	$f\ 472.940$
met 1/5 grens	47	$f\ 266.517$	$f\ 399.138$
met 1/10 grens	41	$f\ 266.517$	$f\ 376.035$

De keuze is arbitrair. Uit praktische overwegingen wordt de 1/10 grens aangehouden; alle voorraadgegevens uit de overige onderzoeken berusten op de 1/10 grens.

Met betrekking tot het specificiteit-criterium het volgende:

Na gesprekken met verschillende scheepswerktuigkundigen mag worden geconcludeerd dat dit criterium niet relevant is voor de beschouwde groep reservedelen. Zonder verlies aan algemeenheid kan men stellen dat elk reservedeel, dat voldoet aan de gestelde investerings- en verwacht-verbruik criteria, specifiek is voor de installatie. Een schip moet immers gezien worden als een geïsoleerd systeem.

Van deze 41 onderdelen (A-artikelen met 1/10 grens) bestaat een lijst met daarin opgenomen: omschrijving, gebruik, aantal aan boord, en aantal voorgeschreven door de classificatie bureau's. Twee opmerkingen ten aanzien van deze lijst.

- In de eerste plaats hebben ook deze gegevens weer betrekking op een bepaald schip, waarvan alle gegevens beschikbaar waren.
De vermelde onderdelen zijn echter, afgezien van merk en type, terug te vinden op nagenoeg alle Grote Handelsvaart schepen.
- In de tweede plaats een opmerking betreffende het (geschatte) verwachte gebruik.

De vraag naar een reservedeel kan men opgebouwd denken uit een drietal componenten:

- een deel van de vraag komt voort uit *gebruiksduurafhankelijk* onderhoud
- een ander deel van de vraag wordt veroorzaakt door een *toestandsafhankelijk* onderhoud
- een derde deel ontstaat uit *storingsafhankelijk* onderhoud.

De invloed van de component *gebruik* blijkt slechts elf codenummers op tijds- of draaiuren basis te doen vervangen; voornamelijk goedkope onderdelen.

De invloed van de component *toestand* op het uiteindelijke verbruik- of vraagcijfer is wel groot.

Voor risicodelen is alleen de component *storing* van belang.

Alleen door breakdown ontstaat een 'toevallige behoefte' aan een reservedeel. Zowel verbruik als gevolg van planmatig onderhoud als verbruik door slijtage zijn voorzienbaar en voorspelbaar en mogen derhalve geen probleem opleveren voor wat betreft het voorraadbeleid. Dit in tegenstelling tot de reservedelen-behoefte als gevolg van breakdown.

Nu op bovenstaande manier de te onderzoeken groep risicodelen is geïdentificeerd, wordt in de volgende hoofdstukken aandacht besteed aan de wijze waarop dergelijke onderdelen kunnen worden behandeld.

6. De risicoschaal

Het voorgaande geeft antwoord op de vraag: welke plaats nemen de risicodelen in, in de totale voorraad. Het nu volgende zal worden gericht op de resterende vragen: wat zijn de consequenties van het ontbreken van een risicodeel; waar moeten risicodelen worden opgeslagen; welke besparingen zijn er eventueel mogelijk ?

– *Stand van zaken*

In het algemeen kan men stellen dat de enorme hoeveelheid literatuur op het gebied van de voorraadbeheersing, met een grote boog heen gaat om de categorie risicodelen.

Er zijn enkele bevredigende oplossingen voor individuele bedrijven bekend (Koninklijke Verkade BV¹² en Franse staalindustrie¹³); van een algemene 'pas-klare' methode is echter nog geen sprake.

Van Dam (KIM, Den Helder³) heeft in zijn proefschrift besproken een procedure met behulp van dynamische programmering, waarmee de samenstelling van optimale reserve- eenheden pakketten voor geïsoleerde systemen kan worden bepaald. Deze benadering is echter niet bruikbaar voor de Nederlandse koopvaardij.

In de eerste plaats stelt van Dam (blz. 3-5) dat het optimale karakter van een reser-vedelenpakket is gebaseerd op een van te voren bepaalde, constante, bedrijfstijd van de installatie. Aan deze voorwaarde wordt zeker door de 'wilde vaart' niet voldaan.

Een tweede reden waarom het onderzoek van van Dam niet wordt toegepast is zijn veronderstelling (blz. 1-11) dat substitutie van een onderdeel door een reserve-eenheid momentaan geschiedt; de downtime van het totale systeem zou mogen worden verwaarloosd.

Deze veronderstelling gaat te ver voor de koopvaardij. Het wisselen van een hoofd-motor-zuiger bijvoorbeeld kost minimaal 8 uur, hetgeen een aanzienlijke procentuele bijdrage zou leveren aan de totale downtime van een schip.

– *Essentialiteit*

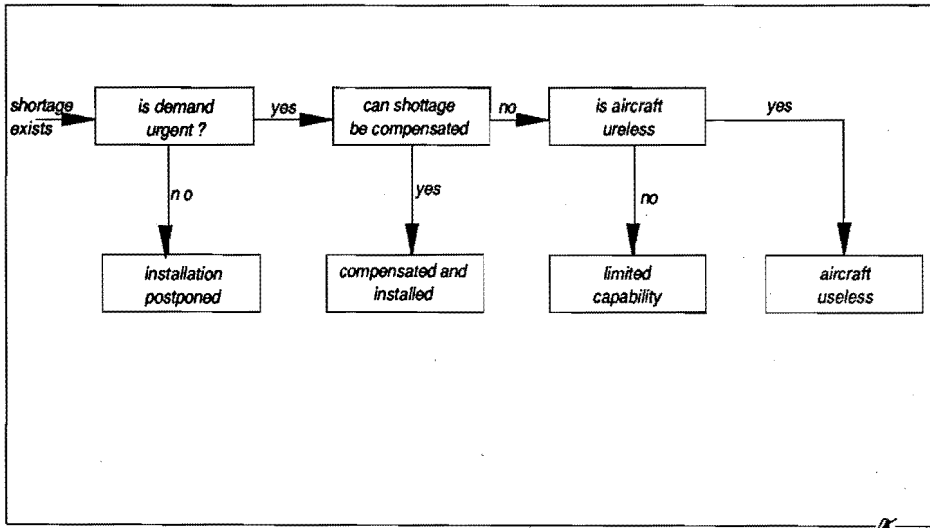
In die literatuur die de risicodelen-beheersing niet uit de weg gaat, wordt aandacht besteed aan het belang van het risicodeel voor de *functie-uitoefening* van het systeem, waarvan het een onderdeel is.

Men omschrijft dit met termen als: *Objektwichtigheid*¹⁵, *essentiality*^{2, 11}, en *missie-effect*⁶.

Karr¹⁰ heeft een artikel gewijd aan 'essentiality of spareparts'. Hij komt tot verschillende essentialiteits-factoren door een team van deskundigen drie vragen te laten beantwoorden, uitgaande van het geval waarin een tekort aan een risicodeel optreedt:

- kan vervanging van het onderdeel worden uitgesteld ?
- kan de uitgevallen functie op andere wijze worden gecompenseerd ?
- wat is het resultaat van het tekort voor het totale systeem

In figuur 5 is dit schematisch weergegeven:



Figuur 5. Bepaling van essentialiteitsfactoren (volgens Karr)

Dit model is welliswaar opgezet voor de luchtvaart, maar een soortgelijk schema kan voor de scheepvaart worden ontwikkeld.

Ook bij de koopvaardij geldt dat niet elk risicodeel even belangrijk is. Inzicht in het relatieve belang van de verschillende risicodelen is dan ook essentieel voor het verantwoord bevoorraden van een schip, zeker als dit moet gebeuren met een vastgesteld, beperkt budget.

– Risico-schaal

Op grond hiervan is een zogenoemde *risico-schaal* opgesteld. Deze schaal vat alle mogelijke gevolgen samen van het ontbreken van een risicodeel in een aantal punten. In grote lijnen bleek dit te kunnen in tien punten, die hieronder zijn weergegeven in volgorde van toenemend missie-effect:

1. geen gevolgen
2. meer onderhoud – korte noodreparatie
3. verminderd leefklimaat
4. uitvallen van een dubbele opstelling
5. uitvallen van automatische regelingen en eventueel varen met een bemande machinekamer
6. langdurige noodreparatie
7. storingen aan de ladingbehandeling; varen met beperkt vermogen
8. uitvallen van temperatuur- en andere regelingen voor de lading
9. uitvallen van beveiligingen ten aanzien van schip, lading en/of opvarenden (bijvoorbeeld: brandprotectie)
10. niet varen en/of niet manoeuvreren.

Aan diverse rederijen werd gevraagd om, met bovenstaande risicoschaal als voorbeeld, een soortgelijke verdeling te maken, althans indien men dat van enig nut achtte.

De reactie op dit verzoek was dat alle rederijen niet alleen zeer positief reageerden op het idee van de risico-inschaling voor reservedelen, maar allen verklaarden zelfs geheel accoord te kunnen gaan met bovenstaande indeling, zonder toevoegingen of wijzingen.

In het vervolg zal dan ook de gepresenteerde risicoschaal worden gehanteerd om enig inzicht te verkrijgen in het belang van de diverse risicodelen. De *nummers* van de verschillende risicoklassen zullen *risicofactoren* worden genoemd.

Het zal blijken dat de risicofactor van een onderdeel een belangrijke indicatie vormt voor de uiteindelijke beslissing over het al dan niet *aan boord of aan de wal* in voorraad nemen van het betreffende risicodeel.

7. Voorraadbeheersing van risicodelen

– Gebruik van de risicoschaal

De gevolgen van het ontbreken van een risicodeel zijn nu in een logische volgorde (van toenemend missie-effect) geplaatst en de risicoschaal is goedgekeurd en geaccepteerd door alle belanghebbenden: opdrachtgevers en reders.

Inzicht in eventuele problemen die zich bij het gebruik van de risicoschaal zouden kunnen voordoen was er niet en derhalve is aan twee grote rederijen, die samen ongeveer 70% van de Nederlandse GHV-vloot bezitten verzocht om aan 41 risicodelen waarop het onderzoek zich concentreert een risicofactor toe te kennen. Ondanks het feit dat het hier twee verschillende technische installaties betreft blijkt dat beide rederijen dezelfde onderdelen hoog op de risicoschaal plaatsen. De scheepswerktuigkundigen die per rederij de risicofactoren hebben toegekend, kwamen snel tot een eensluidend oordeel.

Dat er toch verschillen tussen de rederijen onderling bestaan ten aanzien van de risicofactor voor een bepaald onderdeel, wordt deels veroorzaakt door verschillen in inzicht en ervaring van de scheepswerktuigkundigen die de risicofactoren aan de onderdelen hebben toegekend; maar misschien wel de belangrijkste oorzaak voor de geconstateerde verschillen is het feit dat het twee verschillende scheepstypen betreft: een vracht- en een bulkschip. Sommige technische functies zijn voor het ene scheepstype belangrijker dan voor het andere. Dit zal tot uitdrukking komen bij het toekennen van een risicofactor.

Samenvattend:

Er bestaat bij de rederijen consensus over de risicoschaal en in grote lijnen, over het toekennen van risicofactoren: het gebruik van de risicoschaal.

Dat wil niet zeggen dat voor elke rederij de financiële consequenties van het ont-

breken van een onderdeel met een bepaalde risicofactor gelijk zijn. De uitgaven zullen afhankelijk zijn van diverse factoren, zoals scheepstype en positie van het schip op het moment dat de storing optreedt. Per storing zullen deze uitgaven waarschijnlijk sterk variëren.

– *Financiële consequenties van de risicoklassen*

Zoals gezegd zullen de financieel consequenties verbonden aan elke risicoklasse per situatie verschillend zijn en het is derhalve niet mogelijk om aan elke risicoklasse een (vast) bedrag te koppelen dat de grootte van de uitgaven representeert, indien een bepaalde risicoklasse optreedt.

Toch kunnen er wel enkele opmerkingen worden gemaakt met betrekking tot de te verwachten storingsuitgaven per risicoklasse, waarbij hier onder storingsuitgaven wordt verstaan: alle extra uitgaven, die men pleegt in geval van een storing die vervanging van het onderdeel noodzakelijk maakt, indien dit onderdeel niet in voorraad is aan boord van het betreffende schip.

Het uitvallen van beveiligingen en niet uitvaren en/of manoeuvreren kunnen (de risicoklassen 9 en 10) zullen naar verwachting de grootste storingsuitgaven met zich mee kunnen brengen. Naast een zeer groot missie-effect (een sterke verstoring van de scheepsfunctie) kan ook het veiligheidsaspect een rol spelen. In het uiterste geval impliceert dit het verlies van een schiplading en bemanning. Dit veroorzaakt extra uitgaven die moeilijk nog in geld zijn uit te drukken.

Ook risicoklassen 6, 7 en 8 (zie risicoschaal) onderscheiden zich in termen van te verwachten storingsuitgaven, van de overige risicoklassen. De gevolgen impliceren ook hier een groot missie-effect. Grote schadeclaims, bijvoorbeeld bij ladingbederf, zijn niet uitgesloten. Het veiligheidsaspect speelt hier echter geen rol van betekenis meer.

Bij de risicoklassen 2, 3, 4 en 5 zijn er geen gevolgen voor de scheepsfuncties. Dit betekent dus geen (of een zeer gering) missie-effect. Elke storing van een onderdeel met deze risicofactoren kan worden 'gecompenseerd' met extra manuren. Voor risicoklassen 2, 3 en 4 zullen de storingsuitgaven gering blijven. Voor risicoklasse 5 echter kunnen deze kosten nog hoog oplopen.

Voor risicoklasse 1 ligt de zaak eenvoudig. Geen gevolgen impliceert geen storingsuitgaven verbonden aan deze klasse.

Met bovenstaande overwegingen is getracht duidelijk te maken dat er, hoewel niet is bepaald hoe groot de storingsuitgaven per risicoklasse zullen zijn, toch wel verschil zal zijn in de orde van grootte van de diverse te verwachten storingsuitgaven. Op grond van deze verschillen wordt verwacht dat ook de aanpak voor de

onderscheiden categorieën risicoklassen verschillend zal zijn. De oorspronkelijke tien risicoklassen zullen derhalve worden gecomprimeerd tot de volgende vier categorieën:

- a. onderdelen met risicofactor 9 of 10
- b. onderdelen met risicofactor 5, 6, 7 of 8
- c. onderdelen met risicofactor 2, 3 of 4
- d. onderdelen met risicofactor 1.

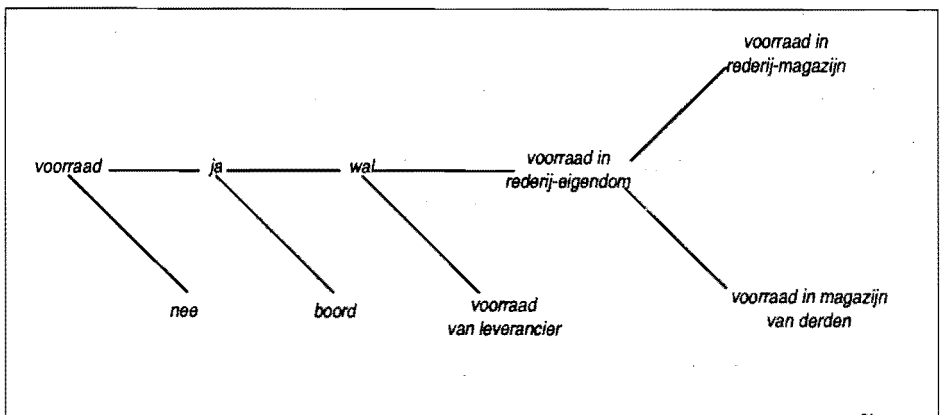
– *Voorraadopunten*

Een van de beslissingen die men moet nemen, indien men een voorraadbeheersingssysteem wil ontwerpen is de beslissing over het voorraadopunt. Met andere woorden: waar moeten de risicodelen worden opgeslagen?

Bij de bepaling van het voorraadopunt kunnen vier beslispunten worden onderkend:

- wel of geen voorraad houden
- indien wel voorraad gehouden moet worden, moet deze dan aan boord of aan de wal worden opgeslagen
- indien men kiest voor de wal, vertrouwt men op de voorraden van de leverancier of schaft men zelf de voorraad aan
- indien de voorraad in eigendom wordt gehouden, wordt deze dan opgeslagen in een eigen magazijn of een magazijn van derden.

Een en ander is schematisch weergegeven in figuur 6.



Figuur 6. Beslispunten bij de bepaling van het voorraadopunt

Zoals uit de figuur blijkt resulteren deze vier beslispunten in vijf mogelijke uitkomsten:

- men besluit geen voorraad aan te houden
- men besluit een risicodeel op voorraad te nemen en wel aan boord. De beperkte voorraadruimte aan boord speelt in de praktijk nauwelijks een rol. Er is een

reserve-onderdelen magazijn dat voldoende groot is, behalve voor de zeer volumineuze onderdelen, zoals bijvoorbeeld: zuigers, zuigervoeringen, tandwielen. Deze grote onderdelen worden her en der in de machinekamer geplaatst.

- men neemt zelf geen voorraad, maar vertrouwt op de voorraden van de leverancier. Sommige scheepsmotoren-fabrikanten houden, verspreid over de gehele wereld, enorme voorraden reserveonderdelen aan.
- de rederij legt zelf een reserve-onderdelen voorraad aan en wel aan de wal in een eigen magazijn (of meerdere magazijnen). De meeste rederijen hebben aan de wal reeds een werkplaats en magazijn, voornamelijk voor de wisseldelen, maar ook opslag van risicodelen zou hier mogelijk zijn.
- de rederij koopt zelf een bepaalde voorraad reserve-delen, maar gebruikt voor opslag magazijnen van derden, bijvoorbeeld de leverancier van de onderdelen.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat de mogelijkheden 4 en 5 (rederij bezit aan de wal een voorraad reserve-onderdelen) slechts dan zinvol zijn indien meerdere bestemmingen voor de onderdelen mogelijk zijn. Indien een onderdeel wordt aangekocht voor één specifiek schip, is het logisch dit onderdeel aan boord van dat schip te plaatsen.

Indien echter een onderdeel voorkomt in de technische installaties van meerdere schepen , zou het voordelig kunnen zijn om dit onderdeel voor die groep schepen aan de wal op voorraad te leggen.

Met betrekking tot de genoemde vijf uitkomsten van de beslissing over het voorraadpunt nog een opmerking. De uitkomsten 3, 4 en 5 vormen drie varianten van de mogelijkheid om risicodelen aan de wal in voorraad te houden. Indien de beslissing eenmaal is genomen om een bepaald risicodeel aan de wal op voorraad te nemen, is het in dit kader minder interessant hoe of waar dit risicodeel precies ligt.

De voor de risicodelenbeheersing relevante keuze mogelijkheden ten aanzien van het voorraadpunt kunnen nu worden beperkt tot drie:

- geen voorraad
- voorraad aan boord
- voorraad aan de wal.

– *Aanzet tot een beslissingsdiagram*

Bestaande oplossingen voor het probleem van de voorraadbeheersing van risicodelen in de grote handelsvaart zijn er niet. Methoden die in andere bedrijfstakken worden gehanteerd lijken minder geschikt. Drie van deze methoden zijn nader onderzocht, te weten: de methoden van Dam⁴, Mèlèse¹³ en Mitchell¹⁴.

- Reeds eerder zijn twee redenen gegeven, waarom de studie van van Dam minder geschikt lijkt voor de Grote Handelsvaart.

Een derde belangrijke reden is de praemisse van van Dam dat, zodra in een systeem een onderdeel uitvalt en er zijn geen reserve-onderdelen (meer) aanwezig, het totale systeem faalt. Dit impliceert dat er geen onderscheid wordt gemaakt met betrekking tot de mogelijke storingsgevolgen van de verschillende risicodelen.

In dit onderzoeksrapport is echter de verwachting uitgesproken dat verschillende methoden van voorraadbeheersing nodig zijn voor de op basis van *storingsgevolgen* onderscheiden risicodelen met een bepaalde risicofactor. Indien de methode van Dam zou worden toegepast zou juist deze nuancering wegvallen en daarom wordt gekozen voor een andere aanpak.

- Mèlèse heeft voor de Franse staalindustrie een voorraadbeheersingssysteem voor slow-movers opgezet dat één echelon kent

Een punt van essentieel belang in het onderzoeksrapport is echter dat juist door het aan de wal leggen van risicodelen voor groepen schepen besparingen worden verwacht op de voorraad. Ook de methode van Mèlèse lijkt derhalve minder geschikt in dit kader.

- Mitchell toonde voor de National Coal Board aan dat de storingsuitgaven voor de meeste slow-movers onafhankelijk blijken te zijn van het feit of de reserve-onderdelen op de plaats van gebruik of centraal waren opgeslagen.

Dit gaat voor de grote handelsvaart zeker niet op. Indien een onderdeel aan boord nodig is en het ligt aan de wal opgeslagen, dan zullen onder andere transportkosten en transporttijd een aanzienlijke invloed kunnen uitoefenen op de storingsuitgaven.

De overtuiging dat bovengenoemde bestaande methoden minder geschikt zijn voor toepassing in de grote handelsvaart en het feit dat een zeer eenvoudige methode de kans op acceptatie in rederskringen groter maakt, hebben geleid tot de keuze voor een methode met behulp van een beslissingsdiagram.

- *Beslissingsdiagram*

Dit diagram zou men aan de hand van bepaalde kenmerken van risicodelen, moeten kunnen doorlopen teneinde de voor dat risicodeel juiste beheersingsmethode te vinden.

Er zij nogmaals op gewezen dat een dergelijk diagram is bedoeld voor *dure reserve-onderdelen* met een zeer lage vraag en dat uitgegaan wordt van de situatie waarin, per rederij, meerdere schepen met een (nagenoeg) identieke technische installatie varen.

De eerste vraag, opgenomen in het beslissingsschema, luidt: is de vraag naar het risicodeel tijds vooraf te voorspellen?

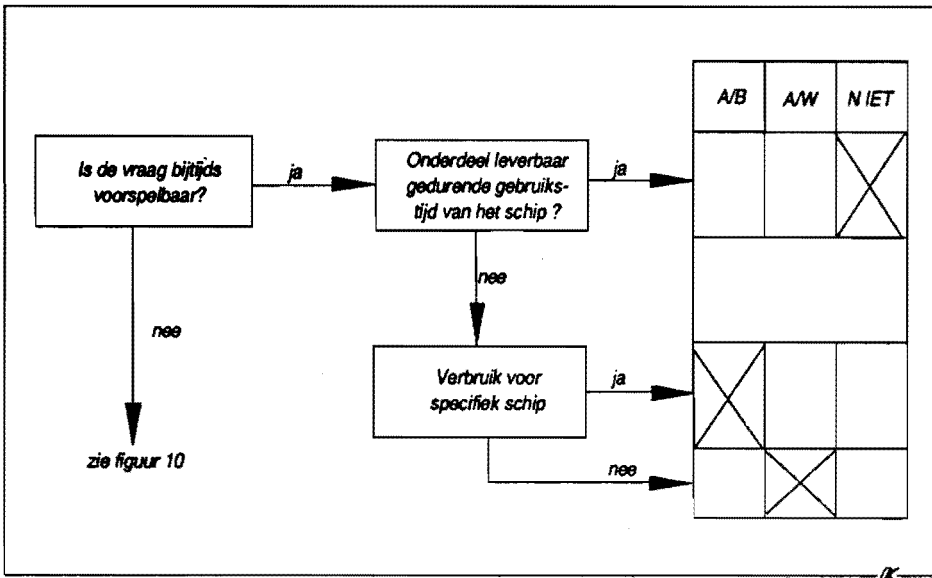
Hierbij wordt onder tijds verstaan dat de voorspelling op een zodanig moment wordt gedaan, dat tussen het voorspelmoment en de realisatie van de gebeurtenis genoeg tijd is om het onderdeel te verkrijgen.

Kortom: de voorspelhorizon moet groter zijn dan de levertijd van het risicodeel. Is het verbruik van een risicodeel niet op adequate wijze voorspelbaar dan komen de verschillende categorieën van risicofactoren aan de orde.

Is het verbruik echter wel op tijd voorspelbaar, dan is dat risicodeel een zogenoemde adequate-warning-item¹⁴.

Deze onderdelen dienen niet in voorraad te worden gehouden, omdat ze op zodanige wijze kunnen worden besteld dat ze net voor het moment waarop de storing zal optreden op de juiste plaats beschikbaar zijn.

Een uitzondering op deze regel vormt de situatie waarin men redelijkerwijs niet kan verwachten dat het onderdeel verkrijgbaar blijft gedurende de gebruikstijd van het schip (gemiddeld 16 jaar). Indien binnen de gebruikstijd van het schip het gebruik van een risicodeel wordt voorspeld en de verkrijgbaarheid van het risicodeel op dat moment is onwaarschijnlijk, dan moet het onderdeel op voorraad worden genomen. Wordt het verbruik voor een specifiek schip voorspeld, dan legt men het risicodeel (of meerdere) aan boord, zoniet dan in een walmagazijn.



Figuur 7. Beslissingsdiagram (eerste fase)

De interesse gaat nu uit naar het geval waarin de vraag *niet (tijds) voorspelbaar is*. Een storing kan op elk willekeurig moment optreden. Door het ontbreken van voldoende historische gegevens kunnen scheepswerktuigkundigen slechts een schatting geven van het verbruik dat zij verwachten. In dat geval worden aan de betreffende risicodelen, risicofactoren toegekend.

Eerder zijn vier groepen risicofactoren (a, b, c en d), en daarmee dus ook risicode-

len, onderscheiden op grond van de verschillen in de mogelijke gevolgen die een defect van een risicodeel zou kunnen hebben. Deze vier categorieën zullen een eigen aanpak nodig hebben. De volgende stap in het beslissingsdiagram moet dan ook zijn: het aangeven welke aanpak voor welke categorie risicodelen het meest geschikt lijkt.

a. Risicodelen met risicofactor 9 of 10

Het ligt voor de hand dat deze onderdelen op zeer korte termijn aan boord beschikbaar moeten kunnen zijn. Gezien het gevaar voor de veiligheid van schip, lading en bemanning, dat het ontbreken van een risicodeel uit deze categorie met zich mee kan brengen, zal men moeten besluiten deze risicodelen op voorraad te nemen.

Ten aanzien van het voorraadpunt zijn er twee alternatieven:

Aan boord of aan de wal. Echter, aangezien het gevolg van een defect van een risicodeel met risicofactor 9 of 10 op een moment dat aan boord geen reserve deel meer aanwezig is, in de meeste gevallen het niet meer kunnen varen en/of manoeuvreren is, zal het feit dat er een reserve-onderdeel ergens aan de wal ligt weinig soelaas bieden. Het schip kan immers op zee niet of nauwelijks op zeer korte termijn worden voorzien van de i.h.a. zware reserve-onderdelen. Op grond van deze overwegingen luidt de aanbeveling:

risicodelen met een risicofactor 9 of 10 moeten aan boord op voorraad worden gehouden en wel van ieder risicodeel minsten één exemplaar.

b. Risicodelen met risicofactor 5, 6, 7 of 8

Ook deze onderdelen moeten snel aan boord beschikbaar kunnen zijn. Welliswaar is bij het tekort aan een reservendeel uit deze categorie de veiligheid van het schip niet direct in gevaar, de storingsuitgaven kunnen hoog oplopen bijvoorbeeld indien men gedurende langere tijd slechts met beperkt vermogen kan varen. Men kan zich dus niet permitteren te wachten op een nieuwe produktie-serie van de fabrikant, voordat over het onderdeel beschikt kan worden. Dit zou in de meeste gevallen een levertijd van enkele maanden impliceren. Derhalve moet er, het zij aan boord, hetzij aan de wal voorraad worden gehouden.

Indien aan boord voorraad wordt gehouden dan betekent dit, dat er voor n zusterschepen, minstens n stuks van een bepaald risicodeel moeten worden aangeschaft.

Indien voorraad aan de wal wordt aangehouden zou men wellicht met minder dan n stuks van dat risicodeel kunnen volstaan. De aanbeveling luidt:

De risicodelen met risicofactor 5, 6, 7 of 8 moeten op voorraad worden gehouden.

Hoe de verdeling van aantallen risicodelen over de voorraadpunten wal en schip moet zijn, zal sterk afhankelijk zijn van de voor ieder alternatief te verwachten storingsuitgaven.

c. Risicodelen met risicofactor 2, 3 of 4

Zoals eerder gesteld zullen de storingsuitgaven na een defect, ook als men geen voorraad van het betreffende onderdeel aanhoudt, gering blijven. Bovendien is het verwachte verbruik voor deze risicodelen klein en zijn de prijzen hoog (gemiddeld $\pm f$ 5.200, – per stuk). Het in voorraad houden van deze risicodelen aan boord van het schip lijkt derhalve niet nodig. Men kan overwegen voor een groep van schepen één of enkele stuks van deze risicodelen aan de wal te leggen, maar ook het niet op voorraad nemen van deze onderdelen is het overwegen waard.

De keus tussen beide alternatieven zal afhankelijk zijn van het verschil tussen de te verwachten storingsuitgaven, indien het onderdeel aan de wal ligt, of de te verwachten storingsuitgaven indien men het onderdeel niet op voorraad houdt en derhalve moet wachten tot de levertijd van dat onderdeel is verstreken. De aanbeveling luidt in dit geval:

Risicodelen met risicofactor 2, 3 of 4 houdt men niet aan boord in voorraad.

Of men voor een groep schepen onderdelen aan de wal legt of geen voorraad aanhoudt, zal afhankelijk zijn met de aan beide alternatieven verbonden te verwachten storingsuitgaven.

d. Risicodelen met risicofactor 1

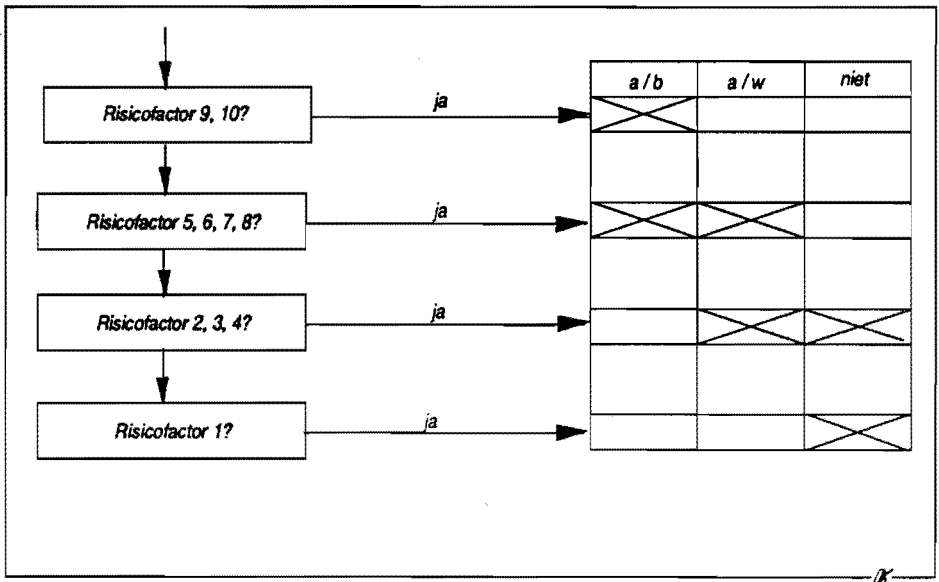
Het ontbreken van een risicodeel met risicofactor 1 heeft geen gevolgen voor het functioneren van het schip. Derhalve hoeven deze onderdelen niet in voorraad te worden gehouden, noch aan boord, noch aan de wal. De aanbeveling is derhalve:
Risicodelen met risicofactor 1 neemt men niet op voorraad

De resultaten van bovenstaande overwegingen zijn nog eens samengevat in onderstaande figuur 8.

– De voorraadhoogte en de bestelprocedure

Tot nu toe is de aandacht sterk gericht geweest op de berekening van het voorraadpunt voor de risicodelen met de verschillende risicofactoren. Het begrip (risicodelen-)beheersing omvat echter meer. Ook over voorraadhoogte en bestelprocedure moet een uitspraak worden gedaan.

De voorraadhoogte bij gegeven criteria hangt sterk af van het voorraadpunt. De keuze van het juiste voorraadpunt voor elk risicodeel hangt echter weer af van de bij dat risicodeel en dat voorraadpunt te verwachten storingsuitgaven. En juist deze storingsuitgaven zijn niet bekend. Men kan een orde van grootte bepalen hiervoor, maar of deze enige nauwkeurigheid bevat kan niet worden aangetoond. Behalve de verwachting dat de voorraadhoogte voor de diverse risicodelen laag zullen zijn, vanwege de lage verbruikscijfers, valt op basis van dit onderzoek over dit onderwerp weinig meer te zeggen.



Figuur 8. Beslissingsdiagram 2e fase

Van 't Hullenaar en van Winkel⁸ stellen dat de (S-1, s) bestelmethode goed toe-
pasbaar is op dure langzaam muterende artikelen, hetgeen de risicodelen zijn.
Dit betekent dat elk artikel dat verbruikt wordt onmiddellijk wordt bijbesteld.
Echter, zo gauw er sprake is van langzaam muterende artikelen en een beperkte
gebruiksduur van de installatie waarvoor die artikelen zijn bestemd, hetgeen bij
schepen het geval is, dan dient deze gebruiksduur in de beschouwingen te worden
betrokken. Indien een risicodeel verbruikt is, zal er reeds een gedeelte van de
gebruikstijd van het schip zijn verstreken. Na elk verbruik zou beoordeeld moe-
ten worden of de resterende gebruikstijd van het schip de aanschaf van een nieuw
reserve-onderdeel rechtvaardigt. De bestelmethode (S-1, s) kan hier dus niet zonde-
r meer worden toegepast.

– *Reacties van rederijen*

Teneinde enig inzicht te verkrijgen in de aannemelijkheid van de in voorgaande
paragrafen aangedragen overwegingen werden drie rederijen verzocht om, op
grond van de risicoschaal en genoemde overwegingen, opnieuw de risicodelen op
hun noodzakelijkheid te beoordelen. Het schip, dat voor de rederijen als voor-
beeld zou dienen, moest aan enkele voorwaarden voldoen:

- het betreft één van minsten twee schepen met een (nagenoeg) identiek tech-
nisch systeem aan boord
- het betreft een schip met een diesel-hoofdmotor.

Stoomschepen hebben immers andere risicodelen dan diesel schepen, zodat
vergelijking van de resultaten moeilijk zou zijn.

De reacties worden per rederij weergegeven.

Rederij 1

Deze rederij reageerde uitsluitend telefonisch. Men drukte zich in enthousiaste termen uit over de risicoschaal en het nut hiervan bij de beslissing over het al dan niet op voorraad nemen van een risicodeel.

Hoewel positief is deze reactie te vaag om enige conclusies aan te verbinden.

Rederij 2

Scheepswerktuigkundigen van deze rederij hebben zoals gevraagd opnieuw de voorraadhoogte en het voorraadpunt van de risicodelen overwogen. Uit de ontvangen gegevens blijkt dat de scheepswerktuigkundigen die de nieuwe voorraad risicodelen hebben samengesteld, slechts drie verschillende voorraadsituaties onderscheiden, te weten:

- geen voorraad aanhouden
- één stuks aan boord van elk schip
- één stuks aan de wal voor de vier zusterschepen gezamenlijk.

Op grond van het onderzoek kan geen uitspraak gedaan worden over het al dan niet beter zijn van deze herziene voorraad risicodelen. Op grond van de door de rederij verstrekte gegevens kan wel worden gezegd dat het zeer aannemelijk is dat er een (aanzienlijke) ruimte voor besparingen bestaat op de voorraad risicodelen die thans wordt aangehouden voor de grote handelsvaart schepen.

Rederij 3

De gegevens van deze rederij zijn (op dezelfde wijze als die van rederij 2) weergegeven in de bijlage. Het schip dat de rederij als voorbeeld heeft gekozen is één van twee zusterschepen, met een 7-cylinder hoofdmotor, een bulk carrier in de wilde vaart. Enkele opvallende punten zijn:

- alle risicodelen die reeds op voorraad lagen, houdt men op voorraad. Ook het aantal stuks blijft nagenoeg gelijk
- elk risicodeel dat men op voorraad neemt, wordt aan boord opgeslagen.

Zowel wat betreft de voorraadhoogte als wat betreft de voorraadpunten wijken de gegevens van rederij 3 zeer sterk af van die van rederij 2. Deze verschillen worden in hoofdzaak veroorzaakt door de volgende punten:

* het zusterschip van het schip dat voor deze rederij als voorbeeld heeft gediend wordt op zeer korte termijn verkocht.

Dit impliceert dat, indien men een andere voorraad risicodelen bepaalt, deze voorraad alleen aan boord wordt gelegd. Voor de risicodelen is slechts één bestemming mogelijk, zodat voorraadhouden aan de wal uitsluitend extra (vermijdbare) storingsuitgaven met zich meebrengt.

* het schip is 'vercharterd', met andere woorden, het vaart in opdracht van derden onder een zeer strak schema, hetgeen gebruikelijk is in de wilde bulkvaart. Niet nakomen van het schema heeft tot gevolg dat de charterer, de opdracht-

gever, hoge boetes van de rederij kan vorderen. Bovendien is de concurrentie in de bulkvaart zeer sterk.

Concluderend kan worden gezegd dat de reacties van de scheepswerktuigkundigen van de rederijen (die 80% van de grote handelsvaart vertegenwoordigen) geen aanleiding vormen om de overwegingen vermeld in voorgaande hoofdstukken te wijzigen.

– *Eisen van de classificatiebureau's*

De omvang van de eisen van de classificatie-bureau's is groot, zie onderstaande tabel.

Tabel 3. Voorschriften van classificatiebureau's met betrekking tot risicodelen en voorraad risicodelen op een schip in lijndienst en een schip in de wilde vaart

	<i>Voorschrift</i>	<i>Risicodelen lijndienst</i>	<i>Risicodelen bulkschip</i>
aantal codenummers	26	41	30
aantal stuks bij die codenr's	43	81	61
investering in codenummers	f 270. 000	f 370. 000	f 393. 000

Ook blijkt uit de tabel dat er meer op voorraad wordt gehouden dan door de bureau's is voorgeschreven. Dit neemt niet weg dat het merendeel van de rederij-vertegenwoordigers, die zitting hebben in de begeleidingsgroep van het deelproject *voorraadbeheer*, het in voorraad houden van sommige risicodelen (bijvoorbeeld tandwielen prijs f 45.000, –) niet noodzakelijk achten.

8. Economische aspecten van het onderzoek.

Eventuele besparingen met betrekking tot de voorraad risicodelen zullen in hoofdzaak op twee gebieden liggen:

- besparing op de initiële voorraad
- besparing op de te verwachten storingsuitgaven.

– *Besparingen op de initiële voorraad*

Een reductie van het assortiment risicodelen leidt vanzelfsprekend tot een reductie van het in voorraad geïnvesteerde vermogen. Om enig inzicht te verkrijgen in de orde van grootte van deze mogelijke besparing is het verschil berekend tussen de voorraad risicodelen zoals die door de scheepswerktuigkundigen van rederij 2 werd bepaald en de oorspronkelijke voorraad risicodelen.

Tabel 4. Besparing op de voorraad risicodelen

	<i>Oorspronkelijk</i>	<i>Herzien</i>	<i>%Reductie</i>
In risicodelen geïnvesteerd vermogen	f 370.000	f 206.000	44%
Aantal codenummers	41	38	7%
Totaal aantal stuks over de codenummers	81	45	44%

Op het in risicodelen geïnvesteerde vermogen wordt bespaard ruim f 160.000. – . Ten opzichte van het totale in voorraad geïnvesteerde vermogen (f 1.300.000) betekent dit een besparing van ruim 12%.

Bij deze grote besparing moeten wel enige kanttekeningen worden geplaatst.

De besparing op het in risicodelen geïnvesteerde vermogen is vanzelfsprekend niet direct te realiseren voor bestaande schepen. De risicodelen liggen daar reeds aan boord. Verkoop is niet lonend (schrootwaarde) en verschrotting is zinloos. Voor bestaande schepen zouden de gegeven overwegingen en aanbevelingen hooguit kunnen leiden tot het niet opnieuw aanschaffen van sommige risicodelen, indien deze verbruikt worden: een *interingsproces*. Echter gezien het lage verwachte verbruik van deze onderdelen, zal dit interingsproces zeer langzaam verlopen.

Voor schepen die men nog gaat aanschaffen is wellicht wel een aanzienlijke besparing op de initiële voorraad mogelijk.

– *Besparingen op de te verwachten storingsuitgaven*

Tijdens de uitvoering van het onderzoek is geen inzicht verkregen in de grootte van storingsuitgaven. Wel is duidelijk dat deze, vooral voor risicodelen met een hoge risicofactor, zeer hoog kunnen zijn.

Voor een indruk van de omvang van eventuele besparingen op de te verwachten storingsuitgaven zal meer onderzoek nodig zijn, gericht op een kwantitatieve analyse van de gegevens.

Een nog uit te voeren kwantitatieve onderbouw van de in dit rapport gegeven aanbevelingen zal moeten leiden tot een optimale voorraadbeheersing van risicodelen voor zeeschepen, waarbij onder optimaal wordt verstaan: de minimale som van te verwachten storingsuitgaven en het in risicodelen geïnvesteerde vermogen.

9. Conclusies en aanbevelingen

– *Conclusies*

– De bestaande voorraad reserve-onderdelen voor grote handelsvaart schepen is bijzonder effectief. Het niet functioneren van een schip, als gevolg van het ontbreken van een reserveonderdeel, komt nagenoeg niet voor (0,02% van de tijd).

– Van de bestaande voorraad reserve-onderdelen ligt, uitgedrukt in gulden, ongeveer een derde deel op voorraad als gevolg van de eisen van classificatiebureau's. Deze bureau's zijn, indien daarvoor redelijke argumenten worden aangevoerd, in principe bereid deze eisen te herzien.

– De risico-delen, waarop het onderzoek zich heeft geconcentreerd, vormen ondanks het feit dat ze slechts 2% van het assortiment betreffen, met een aandeel van 30% een belangrijk deel van het totale in de voorraad reserve-onderdelen geïnvesteerde vermogen.

– Het hanteren van een risicoschaal (i. e. de gevolgen van het ontbreken van een risicodeel, samengevat in 10 punten en gerangschikt naar toenemend missie-effect) bij het nemen van een beslissing over het al dan niet op voorraad nemen van een risicodel, lijkt een nuttig hulpmiddel bij de besluitvorming.

– Aanzienlijke besparingen op het in risicodelen geïnvesteerde vermogen door het toepassen van het beslissingsdiagram lijken zeer goed mogelijk.

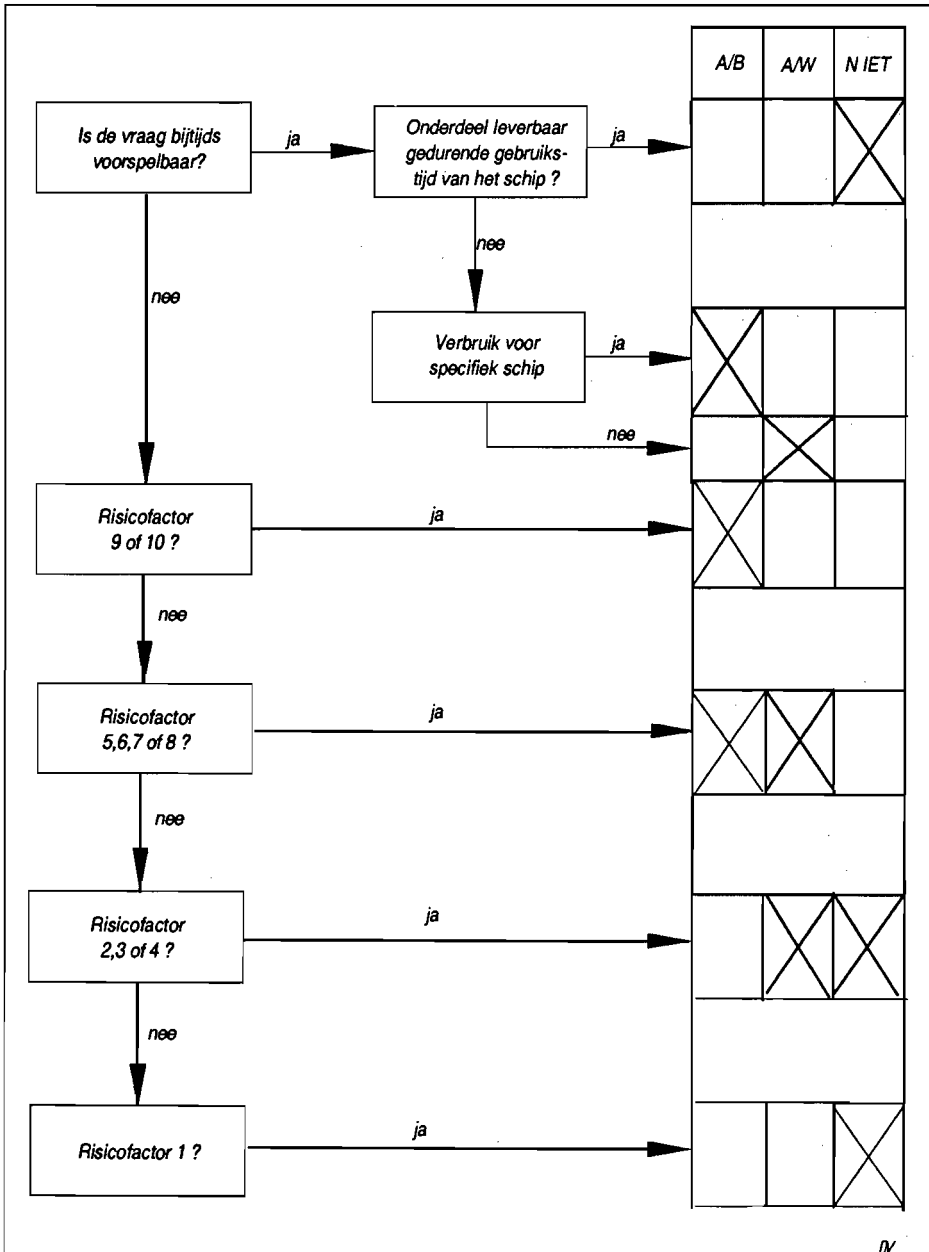
– *Aanbevelingen*

– Op grond van de overwegingen in dit rapport wordt geadviseerd bij de beslissing over het al dan niet op voorraad nemen van risicodelen het *beslissingsdiagram* te gebruiken.

– Er dient meer onderzoek verricht te worden op de volgende gebieden:

- onderzoek naar de *uitgaven* die door het ontbreken van risicodelen worden veroorzaakt. De grootte van de storingsuitgaven heeft grote invloed op de bepaling van de voorraadhoogte en voorraadpunt.

- Naast de risicodelen die in dit rapport centraal hebben gestaan zijn er ook veel *reserve-onderdelen met een iets grotere vraag*, bijvoorbeeld eens per 5 jaar. Ook voor deze reserve-onderdelen is de voorraadbeheersing moeilijk.



Figuur 9. Beslissingsdiagram voor risicodelen

- De *administratieve verwerking* van reserveonderdelen aanvragen, zowel aan boord als aan de wal, verdient nader onderzoek, met als doel de administratieve doorlooptijd van deze aanvragen te verkorten en daarmee tevens de effectieve levertijden van de onderdelen.

- Het ontwerpen van een kwantitatief model voor de voorraadbeheersing van risicodelen. Hieraan is reeds enige aandacht besteed tijdens dit onderzoek; een oplossing is echter niet gevonden.

Literatuur

1. Brackel, L. F. *Voorraadbeheersing van reservedelen*, PBNA - lezing, 1981
2. Burton, R. W. and Jacquette, S. C. *The initial Provisioning for insurance type items*, Naval Research Logistics Quarterly, Nr. 20. 1973
3. Buxton, J. L. *Aspects of Machinery health Monitoring Systems and their role in Classification*. Lloyd's Register of Shipping, Control Engineering Department, London
4. Dam, j. van *Optimalisatie van Reserve-eenheden pakketten* Proefschrift ter verkrijging van de graad van Doctor in de Technische Wetenschappen aan de Technische Hogeschool, Delft. Drukkerij J. H. Pasmans, 's-Gravenhage, 1975
5. *The Spares Business* Drydock, Febr. /Mrt. 1981.
6. Geraerds, W. M. J. *College Onderhoudsbeheersing*, afdeling Bedrijfskunde, Technische Hogeschool Eindhoven,
7. Harris, M. J. *An introduction to maintenance Stores organisation and spares inventory control*, Terotechnica, jaargang 1 (1979) Nr. 1.
8. Hullenaar, F. J. W. H. . van 't, en Winkel, E. C. G. van *Werkgroep Bevoorrading- Voorspel- Technieken. Theoretische achtergronden van enkele RAND studies op het gebied van voorraadbeheer uitgevoerd t.b.v. de USAF*. Department of Industrial Engineering, University of Technology, Eindhoven, Netherlands, april-juni 1970.
9. Inventory Management System, A Radio Shack Publication, Fort Worth Texas, USA.
10. Jansen, Th. H. W. *Voorraadbeheersing van reservedelen met een zeer lage vraag*. Literatuurstudie in het kadervan de studie Bedrijfskunde aan de Technische Hogeschool Eindhoven, Mei 1981.
11. Karr, H. W. *A method of estimating spare part essentiality* Rand Paper P-1064, 17-4-1957, Santa Monica, California USA
12. Kempen, H. J. van *Reservedelen beheer (practisch voorbeeld)* NVDO-rapport 1982-nr. 1: Voorraadbeheer bij Technische Dienst.
13. Mélése, J. , Barache, Cmes, Elina et Hestaux. *La gestion des stocks de peices de rechange dans la sidérurgie* (2nd International conference on operational research, Aix en Provence) English University Press, 1960
14. Mitchell, G. H. *Problems of controlling slow-moving engineering parts* Operations Research Quarterly. 1962, nr 1.
15. Redeker, G. *Bestimmung des optimalen Lagerbestandes an In standhaltungsmaterial und Ersatzteilen*. Beuth-Vertrieb, GmbH; Berlin, Köln, Frankfurt a/M, 1973.

Het voorspellen van de vraag naar reserve-onderdelen voor vliegtuigen

23

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. F.J.W.H. van 't Hullenaer en samengevat en bewerkt door ir. W. Monhemius

Bij de Nederlandse Luchtmacht loopt een onderzoek naar de methoden, die moeten worden toegepast bij de centrale verwerking van informatie, teneinde de beheersing van logistieke systemen te verbeteren. Een belangrijk deel van dit project is het onderzoek naar methoden om een betrouwbare schatting te maken van de toekomstige vraag naar reserveonderdelen.

Dit onderzoek wordt uitgevoerd door een Stafsectie van het Directoraat Materieel van de KLu in samenwerking met de Afdeling Bedrijfskunde van de Technische Hogeschool te Eindhoven.

De hierna volgende studie werd uitgevoerd als de afstudeeropdracht, dat is het laatste deel van de studie voor het verkrijgen van het ingenieurs-diploma aan de THE, door Van 't Hullenaer; zijn bedrijfsbegeleider was Van Winkel; de eindverantwoordelijkheid berustte bij Monhemius.

1. De situatie

Het onderzoek bleef beperkt tot de F-104G vliegtuigen. Deze zijn gestationeerd op drie bases. Iedere basis heeft twee vliegende squadrons met elk ongeveer 20 Starfighters.

De materiedienst op een basis (aangeduid als VE, dat is voorzieningseenheid) voorziet de SMV (squadron materiaal voorziening) van het benodigde.

Inspecties worden uitgevoerd door het grondpersoneel van de vliegende squadrons. Zijn er kleine gebreken, dan worden deze verholpen. Voor grotere gebreken wordt een vliegtuig naar de hangar van de Technische Dienst (TD) gebracht. Ook preventief onderhoud wordt daar uitgevoerd. Heel vaak wordt een storing hersteld door vervanging. Het defecte onderdeel wordt dan gerepareerd in een van de werkplaatsen van de TD.

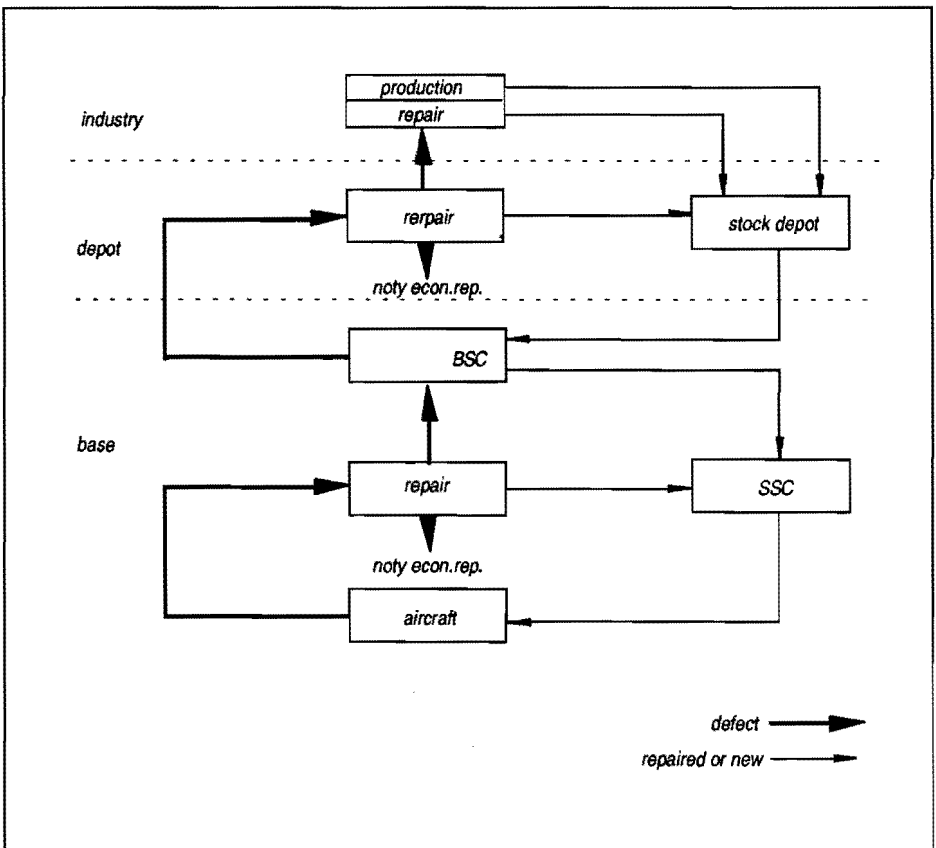
Soms wordt deze reparatie niet verricht op de basis maar in het depot.

De materieeldienst wordt bevoorraad door 2 depots (in het geval van de F-104G): één voor elektronische componenten en één voor mechanische componenten. Deze depots hebben 2 functies:

- bevoorrading met en opslag van materieel
- onderhoud.

Voor het onderhoud zijn reserve-onderdelen nodig. Voor deze benodigde onderdelen wordt gezorgd door de afdeling interne materieel voorziening (IMV). Dit bureau is te vergelijken met een VE, de materieeldienst op een basis.

Het Directoraat Materieel Luchtmacht (DMLu) verzorgt de wederaanvulling van depotvoorraden. De stroom van repareerbare delen is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1. Reserve-onderdelen stroom

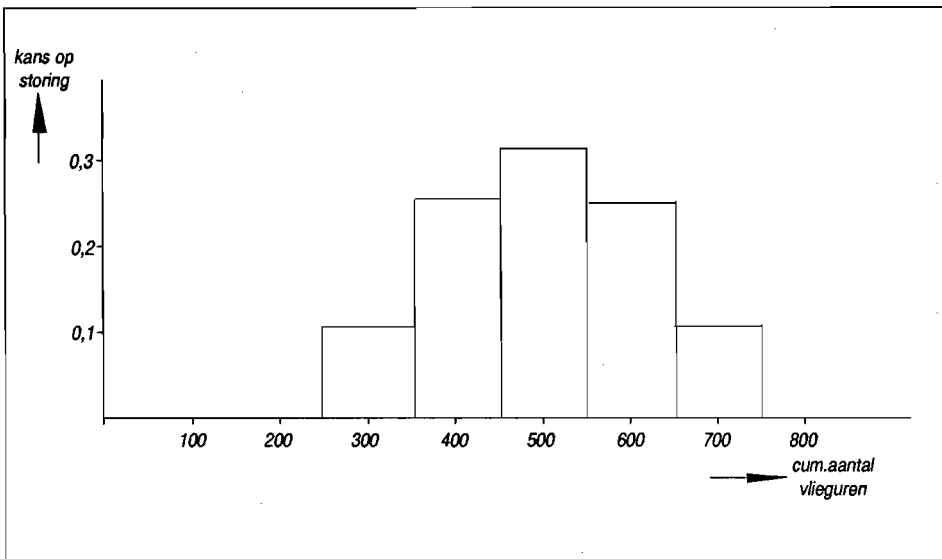
2. Voorspellingen op basis van elementen van de planning

Het aantal vliegtuigen is een van de weinige parameters die wij voor een periode in de toekomst tevoren kennen. Indien er een relatie zou kunnen worden gevonden tussen deze parameters van de vraag naar reservedelen, dan zouden wij betere voorspellingen kunnen maken dan door alleen maar historische gegevens te extrapoleren.

In de Amerikaanse luchtmacht¹ en marine² zijn er onderzoeken verricht over datzelfde probleem. In de luchtmacht kwam men tot de conclusie dat voor vele onderdelen de vraag naar het onderdeel het beste kan worden voorspeld met een techniek, die informatie over geplande vliegtuigen gebruikt (de studie is een vergelijkende). Bij de marine was de conclusie dat er inderdaad een verband is tussen gemaakte vliegtuigen en de behoefte aan onderdelen voor een groep van items. Dat verband bestaat *niet*, of is te zwak voor praktische toepassingen, als het gaat om de vraag naar één bepaald onderdeel op één bepaalde basis.

Waarom *zou* de vraag naar reservedelen in een bepaalde periode correlatie vertonen met het aantal vliegtuigen in diezelfde periode ?

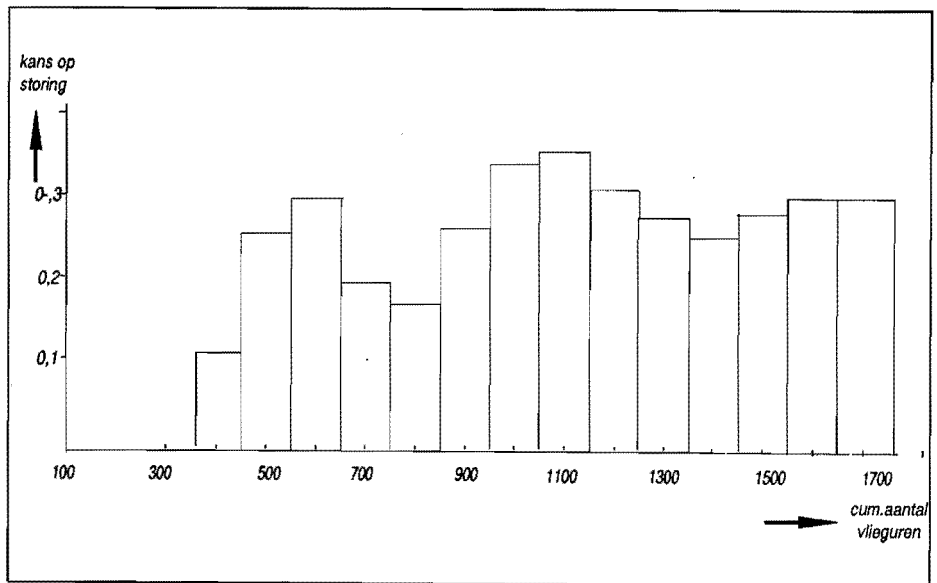
Wij verwachten een correlatie indien de kans op een vraag naar een onderdeel voor elk vliegtuig even groot is, dus constant over de tijd. Items hebben echter heel vaak een ander gedrag over de tijd. Zie bijvoorbeeld figuur 2.



Figuur 2. Correlatie kans op storing en vliegtuigen

In deze figuur is de kans op vraag naar een bepaald item helemaal niet constant over de tijd; dit gebeurt indien een onderdeel gemiddeld na 500 bedrijfsuren defect raakt, met een grote spreiding rond dat gemiddelde.

Indien een defect exemplaar terstond wordt vervangen door een nieuw, en indien wij ook de 2e, 3e en volgende vervanging in beschouwing nemen, wordt de situatie als in figuur 3.



Figuur 3. Correlatie kans op storing en vliegreuen bij directe vervanging na storing

De kans op een storing heeft blijkbaar de neiging, tamelijk constant te worden na een zeker tijdsverloop. Voor items met een negatief exponentieel verdeeld storingsinterval is de kans op een storing per tijdseenheid exact constant.

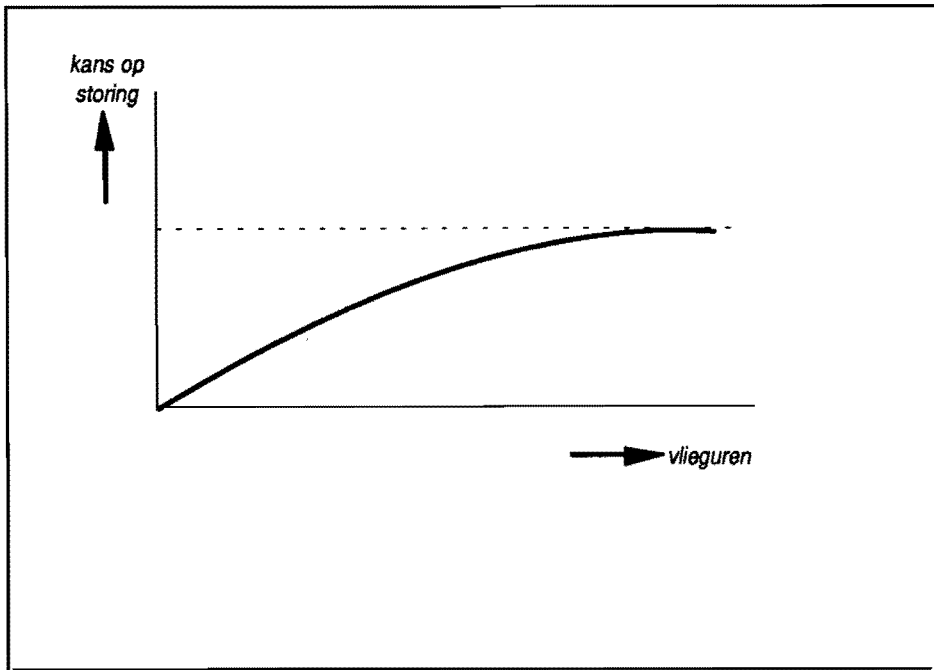
Voor items met een gammaverdeeld storingsinterval met vormparameters $n = 2$ vinden we figuur 4 ; voor de hogere waarden van n krijgen we zoiets als figuur 5.

Wij kunnen de hoogste correlaties tussen vliegreuen en vraag verwachten indien:

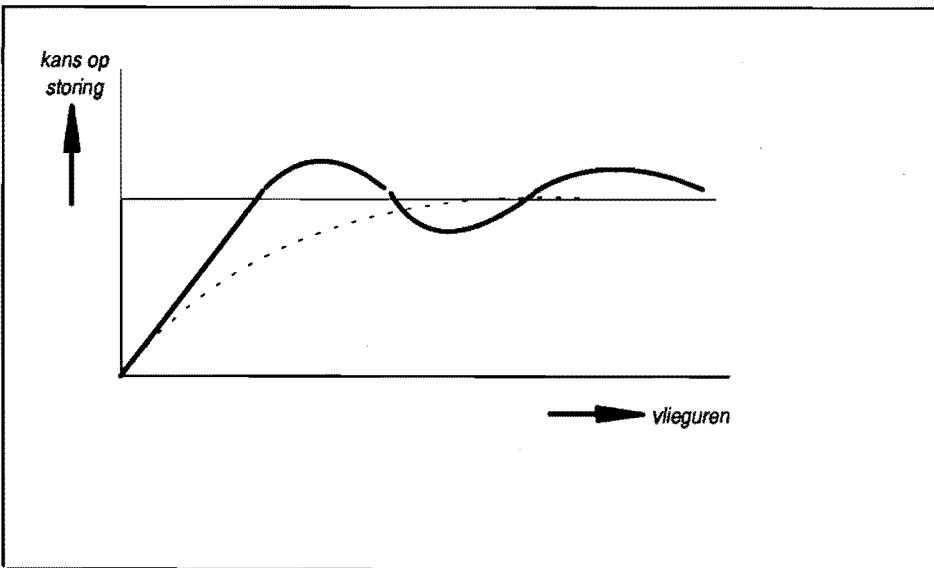
- van eenzelfde item veel exemplaren parallel worden gebruikt
- de tijd, gedurende welke het item reeds in gebruik is lang is in verhouding tot het gemiddeld interval tussen 2 opeenvolgende storingen
- de spreiding in het interval niet te klein is.

'Snellopers' zullen het beste aan deze voorwaarden voldoen. Daarom is er een steekproef uit de snellopers genomen om de gemaakte veronderstellingen te toetsen.

Het is mogelijk, dat een storing, die 'veroorzaakt' wordt door vliegreuen, met een zekere vertraging gevolgen heeft. Het is vooral duidelijk dat dit zal gebeuren indien een defect item wordt vervangen; de reservedelen, die nodig zijn voor de



Figuur 4.



Figuur 5.

reparatie van de defecte component worden met een zekere vertraging gevraagd. Ook als aanwezige voorraad weer wordt aangevuld kan een zekere najling tussen storing en vraag vaak worden verwacht. Tijdens het onderzoek zijn daarom correlaties onderzocht tussen: enerzijds aantal vliegreuen en anderzijds de vraag met verschillende tijdsduren van vertraging.

In de Amerikaanse onderzoeken is deze mogelijkheid van vertraging niet besproken.

3. De steekproef

Gegevens werden verzameld op diverse bases en depots.

Men nam aselect een steekproef van 90 items uit een groep snellopers, die aan de volgende voorwaarden voldeden:

- de items worden alleen voor de F-104G gebruikt
- zij werden in gebruik genomen voor 1-1-1965
- het aantal gevraagde exemplaren was in 1967 meer dan 20.

Er werden 6 groepen van 15 items gekozen, namelijk:

- A. Airframe and accessories (electronic)
- B. Airframe and accessories (mechanical)
- C. Motor
- D. Fire control system
- E. Flight control system
- F. Communications, navigation and identification systems.

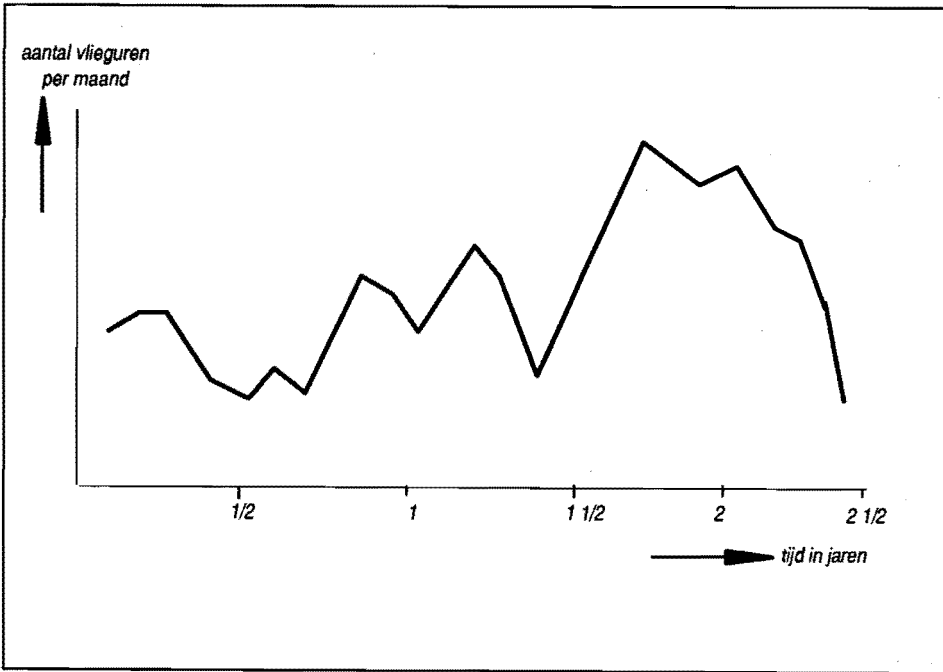
Vier items werden uit de steekproef verwijderd omdat de gegevens niet klopten. Er bleven dus 86 waarnemingen over.

Nadat de gegevens verzameld waren, werd de vraag berekend per maand per item en per basis of interne materieel voorziening (IMV). Gegevens werden verzameld over de periode van 1-7-1965 tot 31-12-1967, dat wil zeggen over een periode van 30 maanden. Uit de verzamelde gegevens kon ook de vraag aan het depot worden afgeleid.

Wij zien in figuur 6 dat het aantal vliegreuen gedurende de onderzoeksperiode veel variatie vertoont; dat is gunstig voor ons doel, immers aan een grootheid die zelf geen of weinig spreiding vertoont heb je niets, als verklarende variabele voor de spreiding in de vraag.

De correlatie is berekend tussen vliegreuen en vraag, voor 24 maanden. Vertragingen van 0 tot 6 maanden zijn beschouwd.

In figuur 7 worden voor basisniveau enkele voorbeelden getoond namelijk de resultaten voor vertraging $\tau = 1$ maand alsook voor $\tau = 3$ maanden.



Figuur 6. Variatie aantal vliegtuigen

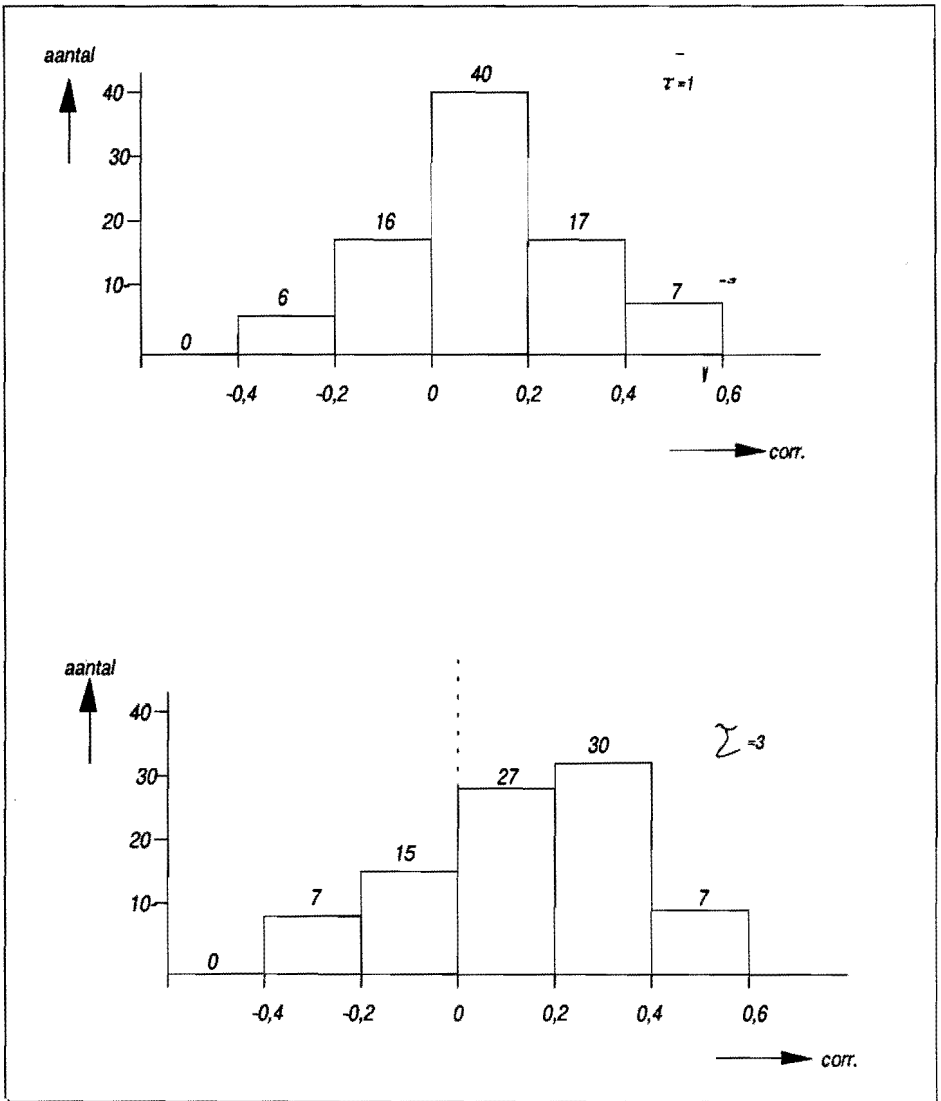
Op dezelfde wijze werden resultaten berekend met gegevens per kwartaal.

Het zou kunnen zijn, dat er bepaalde groepen items bestaan met verschillende vertragingen, waarbij de correlatie optimaal is. Figuur 8. toont de correlatie bij die optimale vertragingen voor maandgegevens.

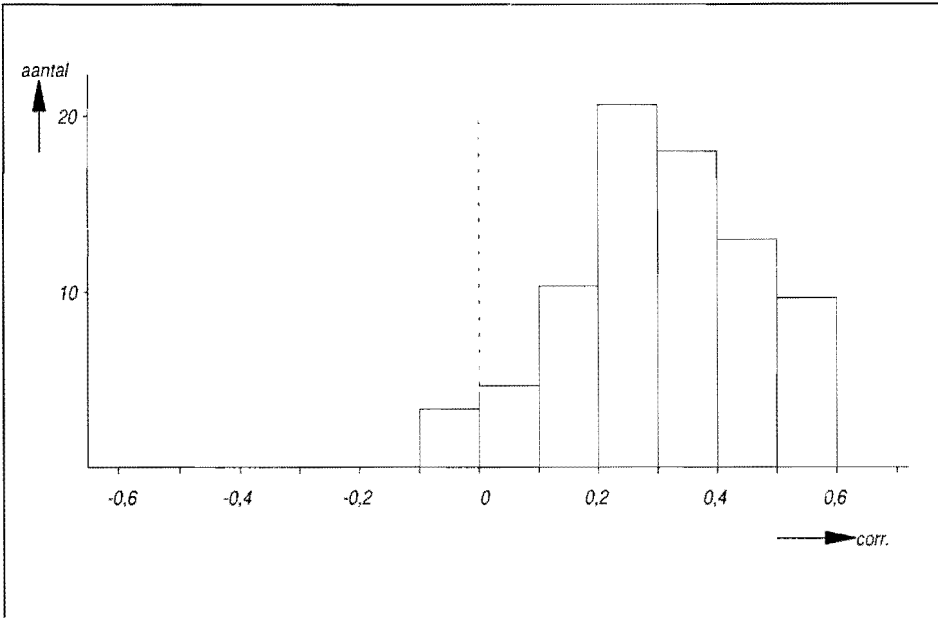
Wanneer correlaties berekend voor 24 getallenparen, hoger zijn dan 0,344 mogen we aannemen met 95% betrouwbaarheid dat er een positief verband bestaat.

In het rapport worden zulke correlaties 'significant' genoemd. Uit de figuur blijkt eveneens, dat ongeveer 40% van de items voor maandcijfers zo een significantie vertoont. De depotgegevens vertoonden een vergelijkbaar gedrag en zijn derhalve niet weergegeven.

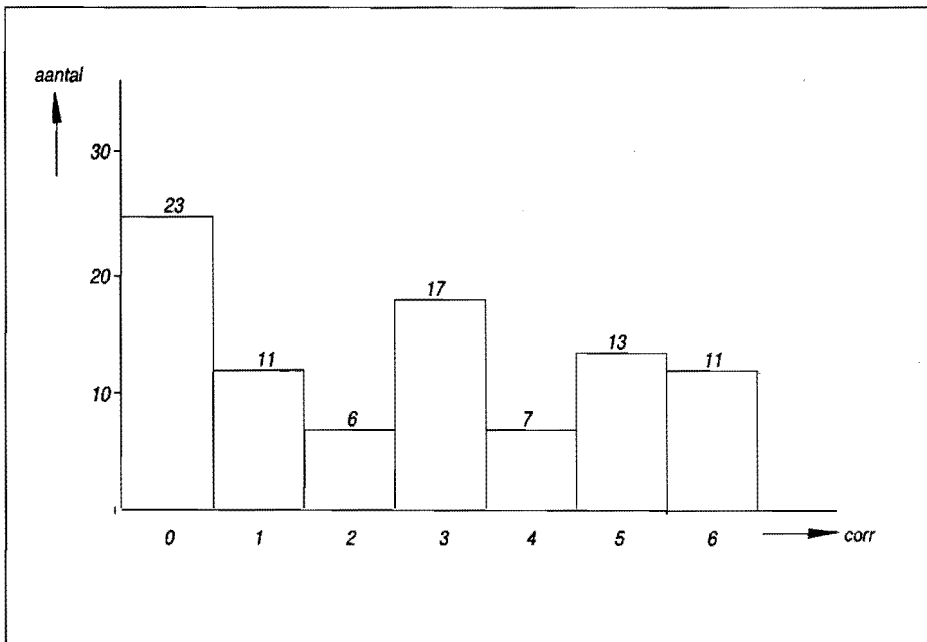
In figuur 9 wordt voor elke vertraging weergegeven, hoeveel items bij die vertraging de grootste correlatie vertoonden.



Figuur 7. Resultaten voor vertraging bij een maand en drie maanden



Figuur 8.



Figuur 9.

– *Conclusies:*

- Een redelijk groot aantal items heeft een significante relatie tussen vliegreuen en vraag als de optimale vertraging wordt beschouwd
- die optimale vertraging verschilt sterk tussen items
- gegevens op basisniveau vertonen een iets betere correlatie dan depotgegevens maar de verschillen lijken niet van groot belang te zijn.

Hierna is het zinnig om te proberen uit te vinden of er parameters bestaan die optimale vertraging en correlatie beïnvloeden. Er is gekeken naar parameters als reparateurbaarheid, prijs, frequentie van de vraag, enzovoort.

4. Analyse van correlaties en vertragingen

Er zijn speciale groepen van items gevormd; onderzocht is, of er hogere of lagere correlatie bestaat tussen vliegreuen en vraag vergeleken met andere groepen.

Zoals in vorig hoofdstuk al is gesteld kan de steekproef worden verdeeld in de volgende groepen; de gevonden gemiddelde correlatie per groep is vermeld.

Tabel 1. Groepverdeling steekproef

Groups of aircraft systems 1	gemiddelde
1. Comm. , nav. and ident. systems	0. 27
2. Airframe and acc. (electronic)	0. 29
3. Fire control	0. 30
4. Motor	0. 34
5. Airframe and acc. (mechanical)	0. 34
6. Flight control	0. 40

In hoofdstuk 3 werden deze groepen aangeduid met de letters A/F, in tabel 1 zijn ze geplaatst in volgorde van toenemende correlatie. Tussen het nummer van de groep en de correlatie vliegreuen – vraag, werd 0, 27 gevonden; voor 86 waarnemingen is 0, 217 de 5% significantiegrens. Op soortgelijke wijze is er significante correlatie indien de zes groepen in volgorde van toenemende gemiddelde optimale vertraging worden geplaatst (indeling ‘groups of aircraft systems 2’).

Geen significante effecten werden gevonden voor de indelingen naar achtereenvolgens prijs, reparateurbaarheid, al dan niet gebruikt bij IMV, onregelmatigheid (‘lumpiness’) van de vraag, bestelserie.

– *Verschillen tussen bases*

De drie bases hebben niet dezelfde taak en evenmin hetzelfde patroon naar vlieguren. Het is dus interessant om de verschillen in correlatie tussen de bases na te gaan. Het enige opvallende punt in tabel 2 is echter dat de optimale vertraging bij IMV veel groter is dan bij de bases. Geen enkel item wordt gebruikt bij twee IMV's tegelijkertijd, dus de twee IMV's werden voor dit doel samen genomen.

Tabel 2. Verschillen tussen bases

bevoorradingscentrum	gemiddelde optimale correlatie	gemiddelde optimale vertraging
Basis 1	0.29	2.85
Basis 2	0.28	2.98
Basis 3	0.28	2.90
IMV	0.28	3.70
Bases only	0.33	2.50
Bases + IMV	0.33	2.6

– *Multiple correlatie*

In het begin van dit hoofdstuk en in tabel 1 hebben wij gezien dat geen van de beschouwde parameters boven het significantieniveau van 5% kwam, behalve 'group of aircraft system'.

Omdat we echter wel correlaties vonden, zij het geen significante, is geprobeerd multiple correlatie te vinden voor meerdere parameters gezamenlijk.

Ook op die wijze werden echter geen significante effecten gevonden.

– *De vijf parameter klasse indeling*

De indruk bestond dat de relaties wel eens niet-lineair zouden kunnen zijn. Na zorgvuldige bestudering van de gegevens werd de volgende niet-lineaire groepering van parameters ontworpen.

I. *regelmaat van aanvraag*: aantal maanden zonder aanvraag.

Er werden 3 klassen onderscheiden:

- $mnd - 0 - < 10$
- $10 \leq mnd - 0 - < 20$
- $mnd - 0 - \geq 20$

II. *bestelgrootte OQ*

Ook hier een driedeling:

- $OQ = 1$
- $1 < OQ < 10$
- $OQ \geq 10$

- III. *IMV*: artikel gevoerd door interne materieel voorziening (2e lijn)
- niet door *IMV* gevoerd
 - in geringe mate (1 of 2 maal)
 - verschillende malen bij *IMV* gebruikt
- IV. *REP*: wel/niet repareerbaar
- repareerbaar
 - niet repareerbaar
- V. *PR*: prijs
- prijs < f 10
 - f 10 \leq prijs < f 500
 - prijs $\geq f$ 500

Met behulp van deze vijf parameters werd de volgende klasseindeling gemaakt:

Tabel 3. Klasse indeling

Combinatie van de waarde van de parameters voor iedere klasse												
	klasse 1	klasse 2				klasse 3				klasse 4		
md - 0-1	1	2	1	2	1	1	2	2	3	3	3	de rest
OQ	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	
IMV	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	
REP	alle	alle	alle	alle	3	3	3	3	3	alle	alle	
PR	alle	alle	alle	alle	3	3	3	3	3	alle	alle	

Deze klasse-indeling heeft een correlatie van -0,36 met de correlatie vliegreun

- vraag, terwijl het 5% significantieniveau bij 0,217 ligt. Nader onderzoek leerde nog, dat OQ de belangrijkste en REP de minst belangrijke parameter is, maar dat de hoogste correlatie toch gevonden wordt als alle vijf parameters worden gebruikt.

- *Het voorspellen van de correlatie 'vliegreun - vraag'*

Er zijn in het voorgaande drie parameters gevonden met significante correlaties:

- de 5-parameter klasse-indeling
- 'group of aircraft systems' (voor optimale correlatie)
- 'group of aircraft systems 2' (voor optimale vertraging).

Hierop gebaseerd kan multiële regressie gebruikt worden om voor een groep items te voorspellen: optimale correlatie respectievelijk optimale vertraging. In het afstudeeronderzoek werd deze voorspeller getoetst door een tweede steekproef van 118 items te nemen, onder dezelfde voorwaarden als de eerste steekproef.

De conclusie daarvan was:

- de enige parameter waarmee de optimale correlatie voorspeld kan worden is de '5 parameter klasse-indeling'
- voor het voorspellen van vertraging is geen goede parameter gevonden.

5. Verwachte correlaties

In hoofdstuk 2 werd aangenomen dat we correlatie zouden vinden indien de kans op een storing (dat is dus: een vraag) gedurende een vlieguur constant is. Indien deze kans constant is, dan is de kansverdeling van het aantal storingen gedurende x vlieg uren een Poisson-verdeling.

Welke correlaties kunnen we dan eigenlijk verwachten ?

De kans op n storingen gedurende x vlieguren bedraagt:

$$P_n(x) = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{1}$$

In het rapport wordt aangetoond, dat de correlatie φ_{xn} tussen x en n bedraagt:

$$\varphi_{xn} = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\lambda} (\mu_x / \sigma_x^2)} \right)^{-1} \tag{2}$$

Uit historische gegevens volgt schatting $\frac{\mu_x}{\sigma_x^2} \approx 10^{-3}$.

De waarde van λ hangt af van het aantal gevraagde stuks per jaar. In tabel 4 wordt in de 2e kolom de waarde voor φ_{xn} gegeven voor het geval dat n een Poisson-verdeling volgt, zoals in formule (1).

Tabel 4.

aantal stuks gevraagd gevraagd per jaar	verwachte correlatie Poisson	verwachte correlatie geometrisch r=0,5	verwachte correlatie geometrisch r=0,8
2	0,30	0,18	0,12
5	0,45	0,28	0,18
10	0,58	0,42	0,25
100	0,91	0,77	0,63
1000	0,99	0,95	0,93

We zien dat de gemeten waarden in de steekproef te laag zijn met de theoretisch verwachte waarden voor een Poissonverdeling

Drie redenen kunnen daarvoor worden gegeven:

- voor een item met een hoge vraag per jaar is bijna altijd voorraad aanwezig bij de squadrons
- veel items worden op de basis gerepareerd; dat kan men niet zien in VE.
- veel items zullen vooral in de eerste maanden van de meetperiode nog niet in de stabiele fase verkeren, maar in de aanloophase (zie hoofdstuk 2)

De invloed van deze storende factoren is het kleinst in de groep artikelen van klasse 1. Maar in tabel 4 zien we, dat zelfs voor deze items de gemeten waarden (ver) onder de theoretische curve liggen.

Zoals hierboven werd betoogd, worden veel items steeds in een aantal tegelijk gevraagd. Voor die items is de Poisson aanname niet realistisch. Een zogenaamde compound Poisson (stotterende Poisson) past beter. In dat geval is de aankomst van het aantal 'klanten' wel Poisson verdeeld, maar het aantal stuks dat door de klanten gevraagd wordt is niet langer 1 per klant, dat aantal volgt één of andere (uiteraard discrete) verdeling. Indien we aannemen, dat deze verdeling een geometrische is dan is de parameter r in die verdeling $r = 0,5$ voor een gemiddelde van twee stuks per 'klant' en $r = 0,8$ voor een gemiddelde van vijf stuks per klant. In tabel 4 is het verband tussen jaarlijkse vraag en correlatie voor de genoemde twee verdelingen ook aangegeven.

6. Extrapoleren of voorspellen ?

Wij hebben gezien, dat de correlaties tussen vliegreun en de vraag naar reservedelen niet erg hoog zijn, zelfs als wij rekening houden met een mogelijke vertraging. Het zou echter kunnen zijn, dat de toekomstige vraag beter is te voorspellen door gebruik te maken van voor-informatie over vliegreun dan door alleen maar tijdreeksen uit het verleden te extrapoleren.

In hoofdstuk 5 werd aangetoond dat correlaties soms laag kunnen zijn zelfs als de kans op een aanvraag constant is per vliegreun.

Om beide groepen methoden te kunnen vergelijken zijn drie voorspellingsmethoden en drie extrapolatiemethoden uitgekozen; deze zullen hierna worden beschreven.

- Voorspellingsmethoden

Techniek 1

Er wordt een lineair verband voorspeld tussen vliegreun en vraag:

$$\text{VRAAG} = a + b \times (\text{VLIEGREUN}) \quad (\text{fig. 11})$$

Eerst worden de correlaties tussen vliegreun en vraag berekend waarbij de optimale vertraging wordt bepaald. Er zijn gegevens over een periode van 18 maanden gebruikt om dat te doen; a en b zijn de waarden die de beste benadering geven voor die 18 maandcijfers wanneer de gemiddelde kwadraatfout als criterium wordt genomen.

Bij de berekening van a en b is rekening gehouden met de optimale vertraging. Nadat uit de eerste 18 maanden startwaarden zijn bepaald, worden iedere maand

nieuwe waarden van a en b berekend. Er wordt aangenomen, dat de vertraging dezelfde waarde houdt.

Techniek 2

Deze techniek is een speciaal geval van techniek 1: a wordt op nul gesteld; overigens is er geen verschil. Het gebruikte verband is dus:

$$\text{VRAAG} = b \times (\text{VLIEGUREN}).$$

Techniek 3

Het model is hetzelfde als techniek 2:

$$\text{VRAAG} = b \times (\text{VLIEGUREN})$$

De startwaarde voor b wordt berekend door middel van regressie, precies zoals in techniek 2. In de tweede maand en volgende maanden wordt de waarde van b echter bijgesteld met behulp van evenredige correctie (e. c. I):

$$b_{\text{nieuw}} = \alpha \left(\text{laatste waarneming} \frac{\text{vraag}}{\text{vlieguren}} \right) + (1-\alpha) \times b_{\text{oud}}$$

Als waarden voor α worden getoetst : $\alpha = 0, 1$, $\alpha = 0, 2$ en $\alpha = 0, 3$.

- *Extrapolatiemethoden*

Techniek 4

Evenredige correctie van de eerste orde (e. c. I). Als waarden voor α worden gebruikt: 0, 10 ; 0, 15 ; 0, 20. De eerste 18 maanden worden gebruikt om de startwaarde te krijgen.

Techniek 5

Evenredige correctie van de tweede orde (e. c. II).

Als waarden zullen worden gebruikt:

$$\alpha_1 = 0, 10 \text{ met } \alpha_2 = 0, 05 \text{ en } \alpha_2 = 0, 01$$

$$\alpha_1 = 0, 15 \text{ met } \alpha_2 = 0, 05 \text{ en } \alpha_2 = 0, 015$$

$$\alpha_1 = 0, 20 \text{ met } \alpha_2 = 0, 05 \text{ en } \alpha_2 = 0, 02$$

Techniek 6

De methode van Harrison. Deze methode is in staat om seizoenspatronen te volgen. Als waarden voor α worden gebruikt: 0, 20 ; 0, 25 ; 0, 30.

Ook hier worden de gegevens van de eerste 18 maanden gebruikt om te initialiseren.

De gegevens van volgende 12 maanden zijn gebruikt om de 6 technieken te vergelijken.

Er zijn twee criteria gebruikt om te bepalen welke van de zes technieken de beste is:

1. De gemiddelde kwadraatfout (per item berekend).

$$1/12 \left\{ \sum_{12 \text{ maanden}} (\text{voorspelling-gemeten waarde})^2 \right\}$$

2. De relatieve fout (per item berekend).

$$\frac{1}{12} \times \frac{\sum_{12\text{mnd}} (\text{gemeten waarde-voorspelling})}{\sum_{12\text{mnd}} \text{gemeten waarde}}$$

Om een eerste indruk te krijgen van de kwaliteit van de verschillende technieken is voor elke techniek berekend:

$$- \text{GKF} = \frac{1}{N} \sum_{N \text{ items}} (\text{gemiddelde kwadratische fout per item})$$

$$- \text{GRF} = \frac{1}{N} \sum_{N \text{ items}} (\text{relatieve fout per item})$$

N = aantal items waarop de technieken zijn gebruikt.

Enkele gevonden waarden voor GKF en GRF zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5.

techniques	parameter	GKF	GRF
1	—	3396	0.330
2	—	2016	-3.04
3	$\alpha = 0.30$	3750	-0.087
4	$\alpha = 0.10$	2173	-0.010
5	$\alpha = 0.10; \alpha = 0.05$	2382	-0.051
6	$\alpha = 0.30$	7243	-0.095

Wij zien dat techniek 2 de beste resultaten voor GKF levert. De waarde voor GRF echter geeft aan, dat techniek 2 de neiging heeft om de vraag te overschatten.

Voor techniek 4 (gewone e. c. I!) is de GKF slechts een beetje hoger dan de GKF voor techniek 2, maar de GRF is een stuk lager.

Wat is de reden voor de verschillen?

Misschien krijgen we meer inzicht als GKF en GRF berekend worden voor de items per klasse van de 5 parameter klasseindeling Zie tabel 6.

Tabel 6.

class techn.	GKF				GRF			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	15,1	13,5	62,8	8832	.071	.235	.134	.608
2	9,1	9,8	43,5	5240	-.037	-.036	-.040	-.735
3	10,7	13,1	58,8	9764	-.036	-.031	-.011	-.186
4	8,8	10,6	43,1	5649	.162	.179	.170	-.302
5	9,9	10,4	57,2	6188	-.119	-.033	.011	-.068
6	10,2	12,0	48,4	18905	.005	.037	.052	-.303

De technieken 2 en 4 hebben bijna dezelfde GKF in de eerste drie klassen. Aan de GRF zien we, dat techniek 4 neigt tot overschatten in de eerste drie klassen. Het blijkt dat de grootste verschillen gevonden worden in klasse 4.

– Conclusie

De analyse heeft aangetoond, dat wellicht een lichte voorkeur kan worden geschonken aan de technieken die vliegreuen gebruiken (zoals techniek 3). Het is echter duidelijk dat de criteria die gebruikt zijn (GKF en GRF) niet in staat zijn om aan te wijzen welke techniek de beste zal zijn. De GKF en GRF kunnen voor sommige klassen sterk uiteenlopen.

Welk criterium moet de voorkeur hebben?

Om die vraag te kunnen beantwoorden moeten we wat meer weten over de bestelmethode. De kenmerken van de bestelmethode moeten vastleggen wat de eisen zijn die worden gesteld aan de voorspelling dan wel extrapolatie van de vraag.

Wij hebben gezien, dat in deze studie de resultaten van de beide Amerikaanse onderzoeken¹ en² bevestigd worden.

De correlaties tussen vliegreuen en vraag zijn tamelijk laag, maar toch vonden we dat waarschijnlijk vele items beter voorspeld kunnen worden door informatie over vliegreuen te gebruiken dan door alleen maar tijdreeksanalyse te gebruiken voor extrapolatie.

Wij hebben ook gezien, dat het tamelijk moeilijk is de items te identificeren waarvoor die uitspraak geldt.

Literatuur

1. *Microsimulation in logistics research*. A comparative study of prediction techniques. Bernice Brown. Rand corporation P-1980 (EM 80046 = OR 786).
2. *A comparison of usage data among types of aircraft* Sheldon E. Haber. George Washington University (EM 847441). Naval research logistics quarterly 14 (1967), nr. 3 (sept), pp. 399-410.
3. *Discrete compound poisson processes and tables of the geometric poisson distribution*. Graig C. Sherbrooke. Rand corporation RM-4831-PR, July 1966.
4. *Short term sales forecasting*. P.J. Harrison. Applied Statistics 14 nr. 2 and 3; pag. 102-132 (1965)
5. *Tijdreeksvoorspellingen en hun bewaking*. E.G.F. van Winkel and D. J. Fraser. Samsom 1970 (Holland)

Beheren van voorraden reserve onderdelen

24

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van dr.ir. E.G.F. van Winkel en ir. L.F.H.M. Brackel en samengevat en bewerkt door ir. W. Monhemius

Ten behoeve van de bevoorrading en reparatie van reserveonderdelen bij de Koninklijke Luchtmacht beschikt deze organisatie (in 1975) over:

- faciliteiten (basisvoorraden en reparatiewerkplaatsen) op een aantal bases
- een aantal depots
deze zijn artikelsgewijs georganiseerd, dat wil zeggen dat een artikel slechts op een depot op voorraad ligt.
Zij verzorgen de bevoorrading van de bases en voeren reparaties uit aan onderdelen, voor zover deze niet op de bases zelf gerepareerd worden. Dit is afhankelijk van de capaciteit en de outillage op de bases
- een overkoepelende inkooporganisatie.

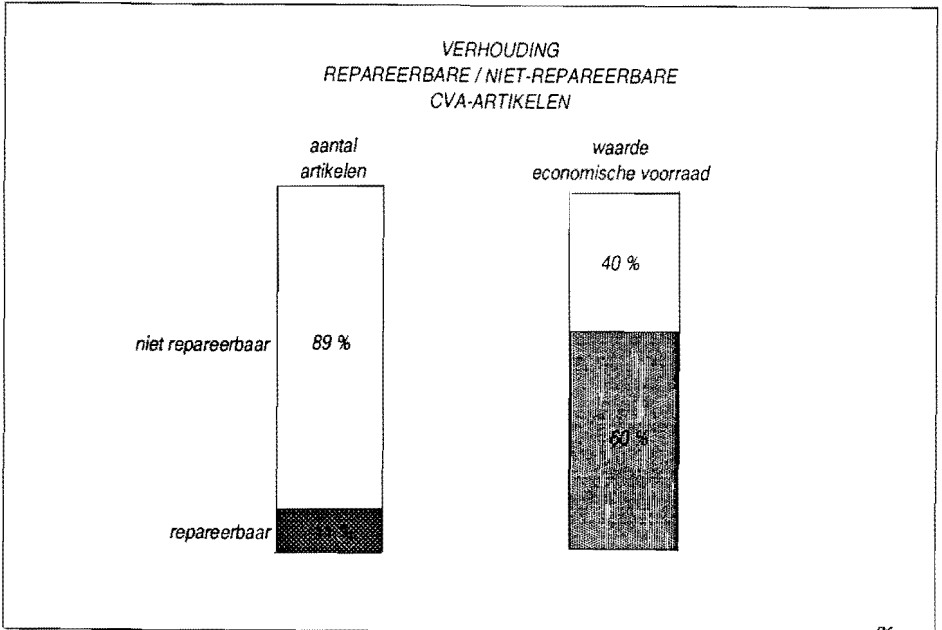
Het totale artikelpakket omvat 165.000 stuks, waarvan 89% verbruiksartikelen en 11% gebruiksartikelen zijn.

De gebruiksartikelen zijn repareerbaar; verbruiksartikelen moeten daarentegen steeds worden vernieuwd.

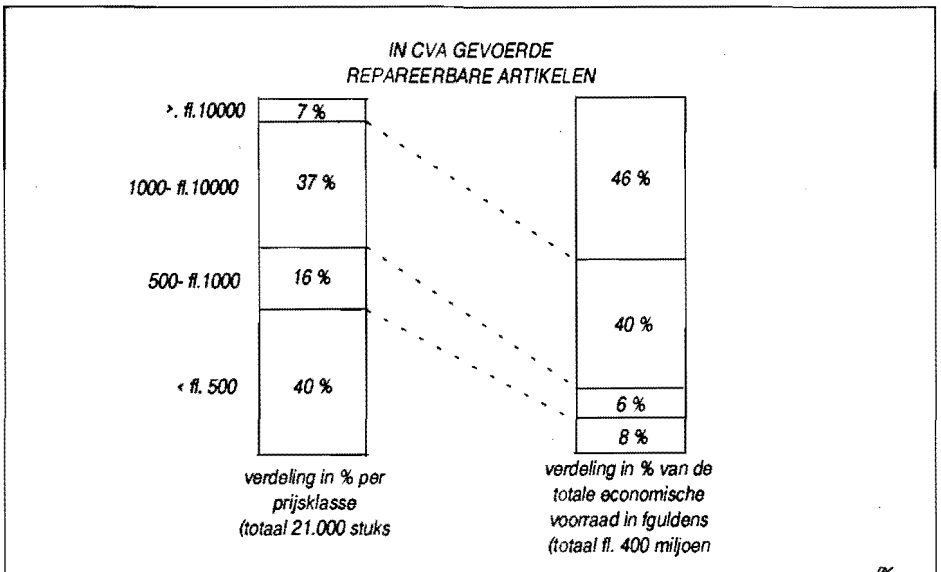
Het voorraadbeheersingssysteem is in eerste instantie opgezet voor de repareerbare artikelen, zodat wij ons verder daartoe beperken.

De volgende karakteristieken van reserve-onderdelen ('spare parts' of 'spares') zijn bepalend voor het voorraadbeheersingssysteem:

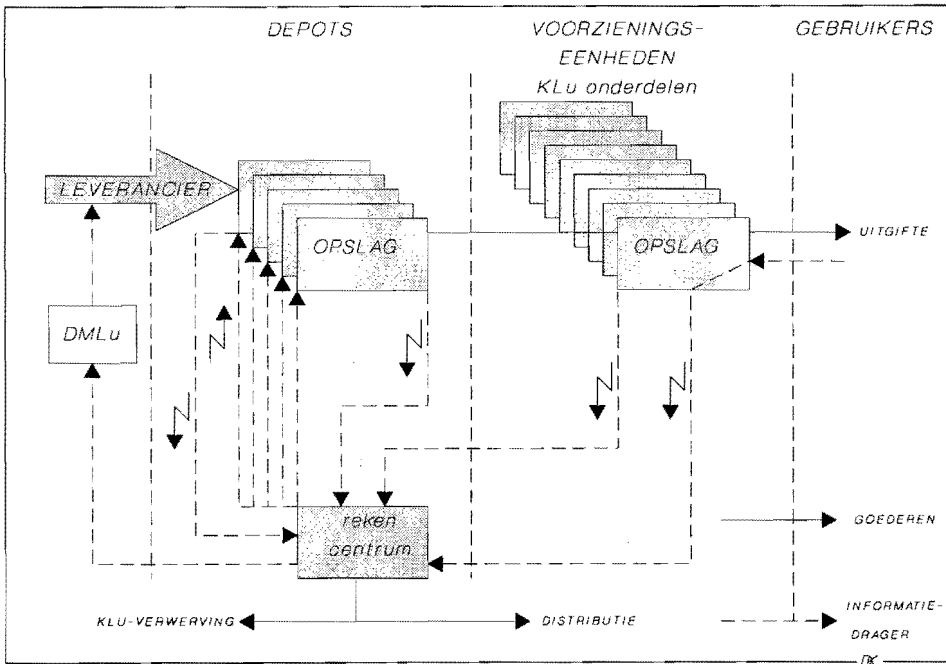
- meestal lage omzetten in de grootte-orde van 1 stuks per jaar (spreiding van 1 stuks per 3 jaar tot 3 stuks per jaar); hierdoor worden schattingen van de gemiddelde omzet volgens de klassieke wijze erg onbetrouwbaar
- de gebruiksartikelen zijn meestal erg duur (zie figuur 1)
- de gevolgen van een eventuele 'stock-out' zijn (vooral bij essentiële onderdelen) vaak zeer ernstig; de kans hierop moet dan ook zeer klein blijven.



Figuur 1a.



Figuur 1b.



Figuur 1c.

1. De doelstelling van METRIC

Voor beheersing van de bovenstaande situatie wordt gebruik gemaakt van METRIC (Multi Echelons Technic for Recoverable Items Control) een systeem van de Rand Corporation, oorspronkelijk ontwikkeld voor de Amerikaanse luchtmacht¹.

Doelstelling A:

De repareerbare voorraad moet optimaal over de bases (de verbruikers) worden verdeeld.

Dit hoopt men te bereiken door middel van een $(s-1, s)$ -policy, waarbij elke gebruiker een streefniveau per artikel heeft.

Doelstelling B:

Het geven van een optimaal aanschaffingsadvies voor een groep artikelen.

Dit slaat niet op de verbruiksartikelen, die vervangen moeten worden, maar op de totale voorraad gebruiksartikelen.

METRIC is opgezet voor gebruiksartikelen.

Hoe is het totale budget zodanig te verdelen dat het aantal naleveringen zo klein mogelijk wordt bij een gegeven budget ?

Hiertoe worden eens per kwartaal de streefniveaus opnieuw kritisch bekeken en eventueel aangepast aan een veranderend gebruikspatroon.

2. Goederen- en informatiestroom

Het METRIC-systeem speelt binnen het geheel van goederen- en informatiestromen.

We kunnen hierbij een distributie- en een verwervingsketen onderscheiden, waarbij het rekencentrum een centrale plaats inneemt. Alle mutaties worden hier dagelijks verwerkt, zodat er steeds bekend is *hoeveel* voorraad er is en *waar* deze zich bevindt.

Opslingereffecten door onnodig bestellen kunnen hierdoor worden vermeden.

– *Distributieketen*

Hierin worden zowel gebruiks- als verbruiksartikelen verwerkt.

Uitgifte vindt plaats op de bases. Mits aanwezig wordt het artikel uit de basisvoorraad afgeleverd. Bij gebruiksartikelen moet hierbij het defecte artikel worden ingeleverd, dat dan òf op de basis, òf op het depot wordt gerepareerd.

Kan er niet onmiddellijk uit de basisvoorraad voor een vervanger worden gezorgd dan is er sprake van een backorder. Op grond hiervan kan het rekencentrum door middel van een verstrekingsopdracht de basisvoorraad uit het depot aanvullen mits dit noodzakelijk is en er voorraad op het depot aanwezig is. Voor gebruiksartikelen hoeft dit niet altijd noodzakelijk te zijn, daar er elk moment een artikel uit reparatie (op de basis) kan komen.

– *Verwervingsketen*

Hierin worden voorlopig alleen de verbruiksartikelen verwerkt. Eens per 14 dagen wordt een besteladvies gegenereerd voor het Directoraat Materieel. Dit advies is gebaseerd op de totale voorraad en het werkelijke verbruik.

Voor gebruiksartikelen wordt deze keten niet doorlopen, daar men er van uitgaat, dat deze artikelen oneindig repareerbaar zijn en niet behoeven te worden vervangen. Omdat deze aanname niet reëel is wil men in de toekomst ook deze artikelen 1x per kwartaal deze keten laten doorlopen.

Ook een eventueel te krap gekozen totaalvoorraad, of de gevolgen van een veranderend gebruikspatroon, kunnen hierdoor worden verwerkt.

3. Criteria

Welk criterium moet men nu hanteren bij het aanschaffen en verdelen van voorraden?

Er zijn vier mogelijke keuze-criteria voor dit probleem:

- minimalisering van de verwachte waarde van het aantal basis backorders, onder een budgetconstraint
- operational rate, dat wil zeggen: de kans dat er zondermeer geen backorders zijn.

Dat is als volgt te formaliseren:

$$\text{Operational rate}_{i,j} = \sum_{x=0}^{S_{ij}} P(x/\lambda_{i,j} T_{i,j})$$

met x = het aantal aanvragen

$\lambda_{i,j}$ = gemiddelde vraag per dag

$T_{i,j}$ = de tijd tot het weer ter beschikking hebben.

Hier worden dus de kansen gesommeerd, voor waarden van X welke kleiner of gelijk zijn aan het streefniveau.

De minimalisering van het aantal backorders en de operational rate zijn complementaire keuze-criteria aangezien op (1 -/- OR), dit is de kans dat er wel backorders zijn, de systeemfunctie voor de minimalisering van het aantal backorders is gebaseerd.

- Nors-state : dit is de verwachting van het aantal Norsvliegtuigen. (NORS: Not Operational Ready due to Supply)
Hierbij wordt er van uitgegaan, dat wanneer er een vliegtuig staat te wachten op een bepaald onderdeel dat in bestelling is, men gedurende deze wachttijd onderdelen uit dit vliegtuig kan halen om andere wachtende vliegtuigen mee te repareren, zodat er maar één vliegtuig staat te wachten op onderdelen in plaats van meerdere. Dat noemt men *maximale kanibalisatie*. De bedoeling van dit criterium is de minimalisatie van het aantal wachtende vliegtuigen.
- Fill-rate ofwel de servicegraad: dit is de kans dat men direct uit voorraad kan leveren.
- *Vergelijking van, en keuze uit de criteria*

Verdere overwegingen met betrekking tot de verschillende alternatieve criteria:

A. Backorders

- het betreft hier een convexe functie, waardoor minimalisatie mogelijk wordt
- de wachttijd en het aantal wachtenden komen in de criteriumfunctie tot uiting.

B. Operational Rate

- spreekt de gebruiker het meeste aan
- het aantal wachtenden heeft geen invloed op het resultaat
- optimaliseringsresultaat is ongeveer gelijk aan dat van A.

C. Nors-rate

- hierbij is maximale kanibalisatie verondersteld; in de praktijk levert dit echter problemen op
- dit keuzecriterium is moeilijk te operationaliseren.

D. Fill-rate

- de vertragingstijd (wanneer er niet uit voorraad geleverd kan worden) is niet verdisconteerd
- het keuzecriterium gaat uit van onmiddellijke levering uit voorraad. In de praktijk is echter enige vertraging veelal acceptabel.

Op grond van onder andere bovenstaande overwegingen is gekozen voor de minimalisering van het aantal backorders als keuzecriterium.

4. Vooronderstellingen van het model

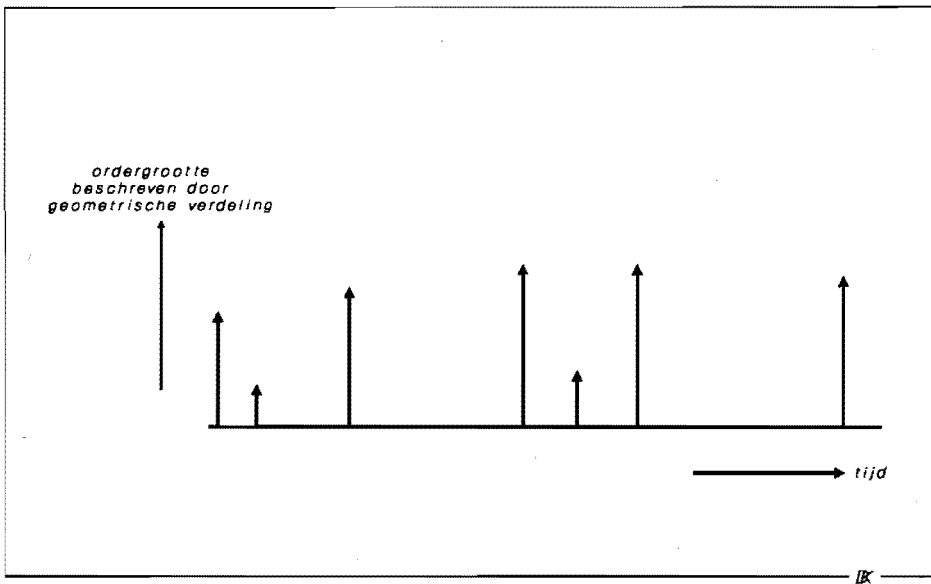
1. Afname aan de voet

voor de beschrijving van het afnamepatroon is het gebruikelijke Poissonproces niet geschikt daar $\sigma^2 \neq \mu$ (voor een Poissonproces moet $\sigma^2 = \mu$ zijn).

Het afnamepatroon wordt beter beschreven door het compound Poissonproces. Dit kan men opgebouwd denken uit twee loodrecht op elkaar staande componenten:

- een Poisson-proces dat aanneemt dat de aankomstintervallen negatief-exponentieel verdeeld zijn.
- een verdeling die daarbij nog de ordergrootte in beschouwing neemt. Hier voor is de geometrische verdeling gekozen. Deze wordt beschreven door:

$$f(x) = (1-e)^x \quad X = \text{ordergrootte (discrete variabele)}$$



Figuur 2. Aankomsten beschreven door Poissonverdeling

Door deze extra stochastiek wordt $q = \frac{\text{variantie}}{\text{gemiddelde}} > 1$ (1 à 7)

Men spreekt wel van 'een stotterend Poisson-proces'.

2. vraag = het aantal verwisselingen
3. de gemiddelde ordergrootte is voor elke basis gelijk
4. het systeem verkeert in een stationaire toestand
5. elk artikel is even belangrijk
6. elke basis is even belangrijk
7. er vindt geen horizontale bevoorrading plaats tussen de bases (tekortenverschuiving)
8. elk gebruiksartikel is oneindig repareerbaar (geen verschrotting). Alle artikelen blijven in het systeem waardoor externe leveranties aan het depot kunnen worden verwaarloosd
9. of een artikel op de basis of op het depot gerepareerd wordt, is slechts afhankelijk van de complexiteit van de reparatie en niet van de werklust
10. de reparatiecapaciteit wordt oneindig groot verondersteld
11. reparatie geschiedt volgens een FIFO-regel (geen batchvorming).

5. Opbouw van het model

– De vraag

Met betrekking tot het model wordt verondersteld, dat de binnenkomst van de aanvragen aan de basis Poisson verdeeld is. De vraag per dag is echter een Compound Poisson verdeling, waarbij de gemiddelde vraag per dag naar artikel i op basis j is:

$$r_{i,j} \quad (\text{zie ook veronderstelling 1}).$$

Van de gemiddelde vraag $r_{i,j}$ wordt de fractie $m_{i,j}$ op de basis gerepareerd. $\mu_{i,j}$ wordt bepaald uit historische gegevens en wordt in het model ingevoerd als een kans.

De gemiddelde vraag per dag van basis j met betrekking tot artikel i aan het depot is dan $r_{i,j}(1 - \mu_{i,j})$. De totale gemiddelde vraag per dag van artikel i aan depot ($j = 0$) is dan:

$$\lambda_{i,0} = \sum_{j=1}^J \lambda_{i,j} (1 - \mu_{i,j})$$

Aangezien $r_{i,0}$ weliswaar de gedeeltelijke vraag is van een 25-tal bases mag worden aangenomen, dat de spreiding van deze vraag kleiner is dan de spreiding van de vraag aan de basis, waardoor de variatiecoëfficiënt $q (= \sigma/\mu)$ ongeveer 1 wordt, waardoor de vraag aan het depot normaal Poisson verdeeld is met gemiddelde vraag per dag $r_{i,0}$.

– Ordergrootte en bestelsysteem

Uitgaande van de karakteristieken van reserve-onderdelen, zoals in het voorgaande zijn bepaald, kan met de formules van Camp worden afgeleid, dat de ordergrootte (f) (van basis aan depot) klein zal zijn; bovendien moet de bestelserie uiteraard een geheel getal zijn. De uitkomst voor f^* wordt daarom meestal 1, soms 2, zelden 3 of meer.

Men heeft daarom gekozen voor een (s, S) -bestelsysteem, met name een $(s-1, S)$ systeem. In de praktijk houdt dit in dat dagelijks gecontroleerd wordt of de voorraad nog op het streef niveau is, zo niet, dan wordt de voorraad op de basis aangevuld.

Ordergroottes $f_{i,j}$ groter dan 1 komen uiteraard ook voor, het betreft dan meestal reserve-onderdelen, waarvan er meerdere dezelfde in een vliegtuig zitten en die gelijktijdig gereviseerd moeten worden.

Zie ook vooronderstelling 1 met betrekking tot de verdeling van de ordergrootte en de invloed daarvan op de verdeling van de vraag.

Vooronderstelling 3 geeft aan dat er vanuit wordt gegaan dat f_j voor elke basis gelijk is.

– *Het opstellen van de doelfunctie*

Hierbij gaan we uit van de stelling van Palm uit de wachttijdtheorie. Deze stelling luidt als volgt:

In een systeem met c parallelle loketten, waarbij $c \rightarrow \infty$ is er geen wachttijd voor de klanten, omdat er oneindig veel loketten zijn. Als de aankomst van de klanten Poisson verdeeld is en de bedieningstijd exponentieel verdeeld is (dit is geen noodzakelijke voorwaarde in deze stelling), dan zal het aantal klanten in de stationaire situatie in dat systeem ook Poisson verdeeld zijn, waarbij het gemiddelde gelijk is aan het produkt van het gemiddeld aantal binnenkomsten en de gemiddelde bedieningstijd.

Deze stelling interpreteren we als volgt:

Als er een klant in het systeem komt, volgens Poisson, wat hier het geval is, wordt er onmiddellijk een bestelling geplaatst. Er kunnen in principe oneindig veel bestellingen gelijktijdig worden behandeld waardoor er oneindig veel loketten zijn.

De bestellingen kunnen dan als klanten worden beschouwd. De bedieningstijd gaat dan in op het moment dat de bestelling wordt geplaatst. De bedieningstijd, die in dit model de vertragingstijd T wordt genoemd, is naar we kunnen aannemen exponentieel verdeeld.

Nu geldt volgens Palm, dat het aantal bestellingen (x) in het systeem (in stationaire toestand) Poisson verdeeld is met als gemiddelde $\lambda_{i,j}T_{i,j}$

Als nu:

$S_{i,j}$ de economische voorraad is van artikel i op basis j

en:

$x_{i,j}$ het aantal stuks van artikel i in bestelling bij basis j

dan is:

$x_{i,j} - S_{i,j}$ het aantal artikelen i in backorder (nalevering) bij basis j als $x_{i,j} > S_{i,j}$.

Dit heten de basis-backorders: $B_{i,j}$

Eerder hebben we gesteld dat het aantal basis-backorders als optimaliseringskriterium willen gebruiken, vandaar dat we nu een functie moeten hebben voor het aantal backorders.

We weten wanneer er backorders zijn, namelijk als $x_{i,j} > S_{i,j}$ en we weten de kans dat $x_{i,j}$ groter is dan $S_{i,j}$.

We komen nu tot de volgende doelfunctie:

$$E(B_{i,j}) = \sum_{x_{i,j} = S_{i,j} + 1}^{\infty} (x_{i,j} - S_{i,j}) \cdot P(x_{i,j} / \lambda_{i,j} T_{i,j})$$

Waarin $E(B_{i,j})$ het verwachte aantal basisbackorders is van artikel i op basis j . De vertragingstijd (basis responsietijd) $T_{i,j}$ in deze formule dient nu verder uitgewerkt te worden.

– *Bepaling $T_{i,j}$*

Uit het voorgaande valt af te leiden dat $T_{i,j}$ opgebouwd is uit de volgende elementen:

- De gemiddelde basis-doorlooptijd $A_{i,j}$ die bestaat uit besteltijd, wachttijd en reparatietijd. $A_{i,j}$ mag bekend worden verondersteld. Eerder hebben we echter gezien dat slechts een fractie $\mu_{i,j}$ van de te repareren artikelen i op basis j wordt gerepareerd, waardoor de bijdrage van de reparatie op de basis aan de totale verwachte vertragingstijd $\mu_{i,j} \cdot A_{i,j}$ is.
- De gemiddelde tijd $A_{i,j}^D$ die nodig is om een onderdeel dat naar het depot wordt gestuurd, terug te krijgen.

Deze $A_{i,j}^D$ is opgebouwd uit de ordershipping-time O_j voor basis j (gemiddeld 5 dagen) en de reparatie-doorlooptijd D_i voor artikel i .

Er zijn nu twee extreme gevallen te onderscheiden:

- Het voorraadniveau op het depot $S_{i,0}$ is oneindig.

In dit geval kan er onmiddellijk uit de depotvoorraad worden geleverd en bestaat $A_{i,j}^D$ alleen uit O_j .

- Er is geen voorraad op het depot, dus $S_{i,0} = 0$.

Dit komt voor bij turn-around artikelen. Dit zijn onderdelen uit vliegtuigen, waarvoor geen reserve-onderdelen in voorraad zijn. Als zo'n onderdeel moet worden gerepareerd, moet dus de totale reparatiedoorlooptijd en ordershipping-time worden gewacht: $A_{i,j}^D = O_j + D_i$.

Normaal echter zal $A_{i,j}^D$ tussen deze twee extremen inliggen, omdat niet de gehele reparatietijd hoeft te worden gewacht, omdat reeds een exemplaar van het betreffende onderdeel in reparatie is en dus een gedeelte van de reparatiedoorlooptijd achter de rug heeft. Om dit tot uitdrukking te laten komen in de formule, wordt de factor $\delta(s_0)$ ingevoerd, die tussen 0 en 1 ligt.

$\delta(s_0)$ zal 0 zijn in het eerste extreme geval, waarbij $s_{i,0} = \infty$ en $\delta(s_0)$ zal 1 zijn in het geval $S_{i,0} = 0$.

De formule van de verwachte vertragingstijd wordt nu:

$$T_{i,j} = r_{i,j} A_{i,j} + (1 - r_{i,j}) (O_j + \delta(s_0) D_i)$$

De term $\delta(s_0)$ kan met een theoretische berekening worden bepaald als een functie van D_i , $E(B_{i,0})$ en $\lambda_{i,0}$.

– *Bepaling λ*

Over de bepaling van λ_{ij} (een zeer groot aantal variabelen) werd in deze voordracht niet gesproken. Zoals men elders kan lezen¹ wordt in METRIC daartoe gebruik gemaakt van de Bayes-benadering waarbij men de informatie van het gehele assortiment gebruikt.

– *Systeemvergelijkingen*

Samengevat zijn dus de vergelijkingen voor het model:

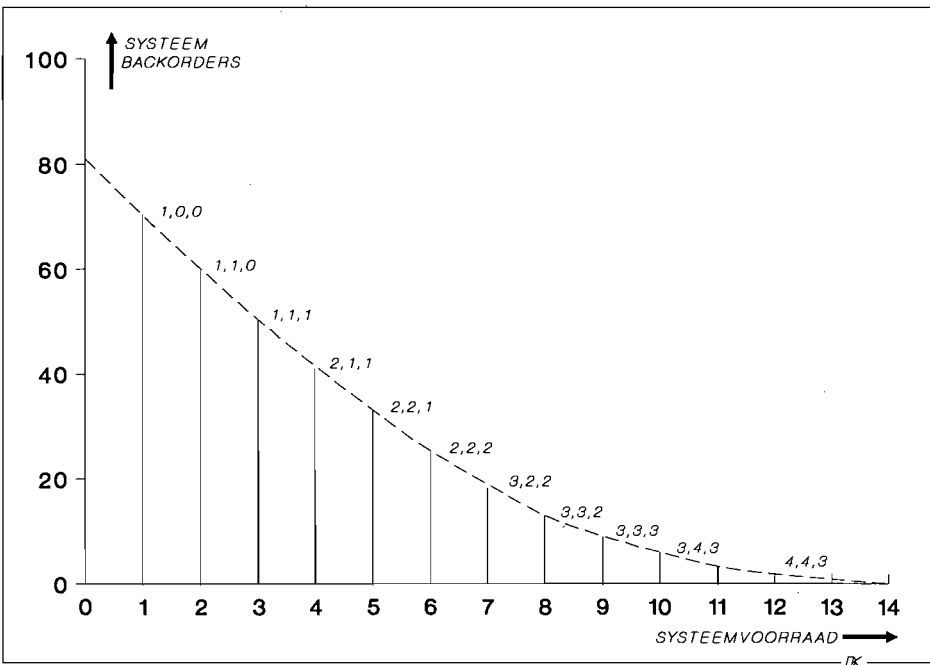
I. De vergelijking om $\delta(s_0)$ te bepalen.

II. $t_{i,j} = r_{i,j} \cdot A_{i,j} + (1-r_{i,j}) \cdot O_j + \delta(s_0)D_i$

III. $E(B_{i,j}) = \sum_{x_j = s_{ij} + 1}^{\infty} (x_{i,j} - s_{i,j}) \cdot P(x_{i,j} / \lambda_{i,j} T_{i,j})$

Vergelijking III heet de backorder-functie met als onafhankelijke variabele $s_{i,j}$ en afhankelijke variabele $E(B_{i,j})$.

De backorder-functie is een convexe functie zoals wordt geïllustreerd in figuur 3.



Figuur 3. Het aantal systeem backorders als functie van de systeemvoorraad

6. Formulering mathematisch programmeer model

Minimaliseer som van de backorders over alle artikelen.

Aan de hand van de getekende functie is in te zien dat als s groter wordt het aantal backorders afneemt. Echter met het vergroten van (economisch streefniveau) zijn kosten gemoeid.

De minimalisering wordt nu beperkt door de voorwaarde; dat de totale investering in voorraden niet groter mag zijn dan een bepaald budget K .

7. Oplossing mathematisch programmeermodel

1. Bepaal van alle artikelen de backorder-functie
2. Stel voor elk artikel een bepaalde s_j vast: e_j en bereken het totaal aantal backorders
3. Voeg één artikel toe aan elke backorder-functie en bereken het nieuwe totaal aantal backorders bij elke toevoeging
4. Kies nu de toevoeging waarbij de vermindering in backorders het grootst is en bereken het daarbij behorende kapitaalbeslag
5. Voeg nog een artikel toe aan het in punt 4 beschouwde artikel en bereken de nieuwe totaal aantal backorders
6. Ga naar 4 tot dat de kapitaalsrestrictie wordt overschreden

Voor de computerberekening is de uitvoering van bovenstaand algoritme omslachtig en kostbaar. Om deze reden is bovenstaand algoritme, hoewel mathematisch geheel correct, vereenvoudigd tot een methode waarbij het 'La Grange multiplier model' wordt gebruikt. Het voordeel hiervan is dat niet meer door het gehele assortiment hoeft te worden gesprongen, maar dat artikel na artikel kan worden beschouwd.

8. Uitwerking van de doelstellingen van METRIC met behulp van methode II

– *Doelstelling A*

Optimale verdeling van de aanwezige voorraad per artikel.

– *Doelstelling B*

Optimaal aanschaffingsadvies voor groep artikelen (bijlage 9).

9. Analyse van de praktische bruikbaarheid van het model

- Er wordt aangenomen dat het systeem in een stationaire toestand verkeert. Deze aanname is alleen geldig binnen een bepaalde periode. Als de artikelgegevens snel wijzigen, dan moet dit opgevangen worden door het verhogen van de berekeningsfrequentie.
- Is de Compound-Poisson-aanname over de vraagverdeling redelijk? Daar het gaat om dure, complexe artikelen, waarvoor het aantal verwisselingen per tijdseenheid erg klein, lijkt deze aanname zeer redelijk. Bovendien is het te testen of aan de Poisson-aannames is voldaan.

De compound-aanname met $q > 1$ bleek in de praktijk alleen aannemelijk te zijn voor die artikelen die in meervoud in één vliegtuig (= klant) voorkomen. Deze situatie is een uitzondering. Ook deze aanname wordt nog verder getest.

Voor het model moeten de q 's voor elke basis gelijk zijn. Deze aanname lijkt wel redelijk daar elke basis dezelfde vliegtuigen heeft.

- Er wordt aangenomen dat de $r_{i,j}$ alleen afhankelijk is van de complexiteit van de reparatie en niet van de werklast. Maar het kan bijvoorbeeld in vakantietijd voorkomen dat er meer naar het depot wordt gestuurd. Dit kan opgevangen worden door de $r_{i,j}$ te schatten uit een lange periode van waarnemingen, waardoor seizoenseffecten uitgemiddeld worden. Het schatten van $r_{i,j}$ moet erg nauwkeurig gebeuren, daar het eindresultaat sterk door afwijkingen kan worden beïnvloed (zie gevoeligheidsanalyse).
- Het model gaat uit van een FIFO-regel bij reparatie, waardoor geen batchvorming mogelijk is. In de praktijk komt batchvorming weinig voor, hooguit op de depot's. Er wordt dus meestal aan deze aanname voldaan of anders wordt hij benaderd door het besturingssysteem van het depot, dat zoveel mogelijk een verplichte seriegrootte van 1 oplegt.
- De $(s-1, S)$ -policy geeft in de praktijk geen problemen.
- Op de depot's staan ook wel vliegtuigen om bijvoorbeeld apparatuur te testen. Deze situatie wordt in het model opgelost door het depot ook op te nemen als basis, waaraan dan ook optimaal voorraad wordt toegewezen.
- In het model neemt men aan dat elk artikel weer reparerbaar is. Er is dus geen plaats voor verschrotting (uitval), die echter in de praktijk wel zal optreden. Men heeft daarom het model gemodificeerd ten behoeve van de aanschafbere-

kening (niet ten behoeve van de voorraadverdeling; men houdt hier geen rekening met de verwachte verschromping, daar men toch niet weet wáár deze plaats zal vinden).

- Het model houdt geen rekening met eventuele in de praktijk optredende horizontale bevoorrading (tekortenverschuiving tussen bases).
In de praktijk zal dit een wat lagere backorder-waarde opleveren.
- In het model is elk artikel en elke basis even belangrijk. Men heeft daarom overwogen om aan elk artikel en aan elke basis een 'essentialiteits'-factor toe te kennen.
Deze procedure is gemakkelijk in de berekening op te nemen: gewogen som van de backorders. De operationalisering ervan is echter erg moeilijk: hoe moet men een artikel of basis waarderen?
- Ook bleken er problemen te bestaan bij de definiëring van de vraag. Verwisselingen tijdens het groot onderhoud van een vliegtuig moeten niet bij de vraag worden meegeteld.

10. Gevoeligheidsanalyse

Er wordt hier gekeken naar de gevoeligheid van het berekende resultaat voor fluctuaties en onbetrouwbaarheid in de parameters. De gevoeligheid is groot voor:

- $+ A_{i,j}$ bij een hoge $r_{i,j}$ en een kleine D_i .
- $+ r_{i,j}$
- $+ D_i$ bij lagere $r_{i,j}$
- $+ q_i$ bij grotere rT

11. Analyse praktische bruikbaarheid METRIC

- een basis die weinig zelf repareert (lage $r_{i,j}$) krijgt automatisch een hoge voorraad toegewezen (hoge $s_{i,j}$) terwijl een basis die zelf veel repareert een lage $s_{i,j}$ krijgt.

Remedie: het analyseren van de input en output van de bases voordat de streefniveaus voor de eerstvolgende periode worden toegekend.

– verkeerde een artikel in de afgelopen periode langdurig in een prio-situatie, dan bestaat het gevaar dat het onvoldoende wordt aangeschaft: moet men op de basis daardoor voor andere artikelen langer wachten, dan ontstaat de geneigdheid om meer zelf te repareren, waardoor $r_{i,j}$ stijgt en $A_{i,j}$ en D_i afnemen. Rekent men met deze gegevens klakkeloos door, dan zal er onvoldoende aangeschaft worden.

Remedie: kijken hoeveel prio's er in de afgelopen periode waren en aan de hand daar van een compensatie vóór de 'La Grange' berekening aanbrengen.

– sommige artikelen hebben een verschillend artikelnummer omdat zij van verschillende leveranciers afkomstig zijn, maar zijn verder identiek. Door het identieke artikel te gebruiken is een backorder te voorkomen. Neemt men deze artikelen separaat mee in de berekening, dan zijn de optimale verdeling en het aanschafadvies niet optimaal.

Remedie: een extra berekening maken voor één gecombineerd dummy-artikel. Het probleem dat de artikelen 1-zijdig equivalent zijn, is nog niet opgelost.

- bij de aanschaffingsberekening wordt geen relatie gelegd met:
 - de afhankelijkheid van de reparatie-doorlooptijd van wachttijden op de reparatiedelen (bouten, pakkingen).
 - de werkplaatscapaciteit: het kan misschien goedkoper zijn om een bepaalde machine aan te schaffen in plaats van een aantal artikelen op voorraad te leggen.

Remedie: nog niet gevonden.

– er is ook geen relatie gelegd tussen 'Line Replacable Units' (zelfstandig verwisselbare artikelen, bijvoorbeeld een motor) en 'Shop Replacable Units' (bijvoorbeeld een aan bovengenoemde motor gekoppeld artikel dat gerepareerd wordt binnen de reparatietijd van de motor en zodoende geen backorder kan vormen).

De SRU's zijn alleen van belang voor de aanschaffingsberekening.

Remedie: toepassing van een METRIC-variant (MOD-METRIC) die hier niet verder besproken wordt.

PARAMETERS

j	= 0, 1, 2, . . . , J: de bases, waarbij $j = 0$ het depot is
i	= 1, 2, 3, . . . , I: de artikelen
$S_{i,j}$	= basisstreefniveau voor basis j van artikel i
$S_{i,0}$	= streefniveau depotvoorraad
x_i	= aantal artikelen i in bestelling (tenzij anders ver meld)
$r_{i,j}$	= gemiddelde vraag per dag van artikel i aan basis j
$T_{i,j}$	= de vertragingstijd
σ	= standaarddeviatie
μ	= gemiddelde
q	= variatiecoëfficiënt (σ/μ)
$B_{i,j}$	= aantal basis backorders
$E(B_{i,j})$	= verwachting van $B_{i,j}$
$\mu_{i,j}$	= de kans dat artikel i op basis j gerepareerd wordt
$A_{i,j}$	= basisdoorlooptijd
$F_{i,j}$	= ordergrootte
$\delta(S_0)$	= vertragingfactor bij depotbackorder
O_j	= ordershippingtime van depot naar basis j
D_i	= depot-reparatiedoorlooptijd
K	= budgetbeperking
C_i	= huidige systeemvoorraad

ONDERHOUDSBEHEERSING

INLEIDING

Reeds in 1972 benadrukte Geraerds in zijn befaamd artikel 'Towards a theory of maintenance' het belang van het onderhoudsconcept, de regels die voorschrijven hoe een technisch systeem te onderhouden.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat het onderzoek onder zijn leiding zich toespitste op het ontwerpen van concepten.

De eerste jaren was dit werk exploratief van aard; vele aspecten van de probleemstelling werden naderbekeken. De verkregen inzichten resulteerden uiteindelijk in een ontwerp kader dat de stappen weergeeft die nodig zijn om tot een concept te komen.

Hoewel veel van het exploratieve werk nog steeds actueel is, treft u in dit gedeelte van het boek slechts publicaties aan die betrekking hebben op het ontwerp kader.

Van der Gaag verhaalt over een van de eerste toepassingen van het complete kader. Het voorgestelde onderhoudsconcept wijkt nogal af van de bestaande wijze van onderhouden.

Als voornaamste struikelblok komt het ontbreken van bruikbare informatie over het storingsgedrag naar voren.

Een afwijkend voorstel en het ontbreken van informatie zien we ook bij andere toepassingen.

Delahay gaat in op het ontwerpen en implementeren van een storingsregistratiesysteem, dat toegesneden is op gebruiksduurafhankelijk onderhoud.

Toestandsafhankelijk onderhoud is in zijn situatie niet aan de orde, omdat inzicht in de processen die aan het storingsgedrag ten grondslag liggen ontbreekt.

Claus concentreert zich op een formele informatie analyse van het onderhoudsconcept.

Dit resulteert in de functionele specificaties van een informatie systeem dat het concept ondersteunt.

Vervolgens gaat hij na in hoeverre het bestaande systeem voldoet.

Het onderhoudsconcept is één van de mogelijkheden om het storingsgedrag van een technisch systeem te beïnvloeden. Een andere mogelijkheid is natuurlijk modificatie van het systeem.

Breure zet deze mogelijkheden naast elkaar en beschrijft een beslissingsdiagram om op economisch verantwoorde wijze een keuze te maken.

Tenslotte onderzoekt Wouters, indachtig het motto 'onderhoud begint op de tekenplank', in hoeverre tijdens het ontwerpen van het technische systeem al rekening kan worden gehouden met de effecten van deze beslissingen op het onderhoudsconcept.

Het ontwerpen van het onderhoudsconcept een toepassing bij mora snacks

26

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. M.C.A. van der Gaag en samengevat en bewerkt door dr.ir. C.W. Gits

In dit artikel wordt beschreven hoe het ontwerpen van een onderhoudsconcept voor een flensenmachine bij Mora Snacks B. V. is aangepakt. De relevante aspecten van de machine en van het bedrijf worden vastgesteld. De werkwijze in de onderscheiden ontwerpstappen wordt weergegeven.

1. Inleiding

Mora snacks is producent van diepvries snacks zoals kroketten, hamburgers, loempia's. Het bedrijf heeft ruim 400 mensen in dienst die een omzet van 80 miljoen gulden per jaar realiseren. Bij de technische dienst zijn 30 mensen werkzaam.

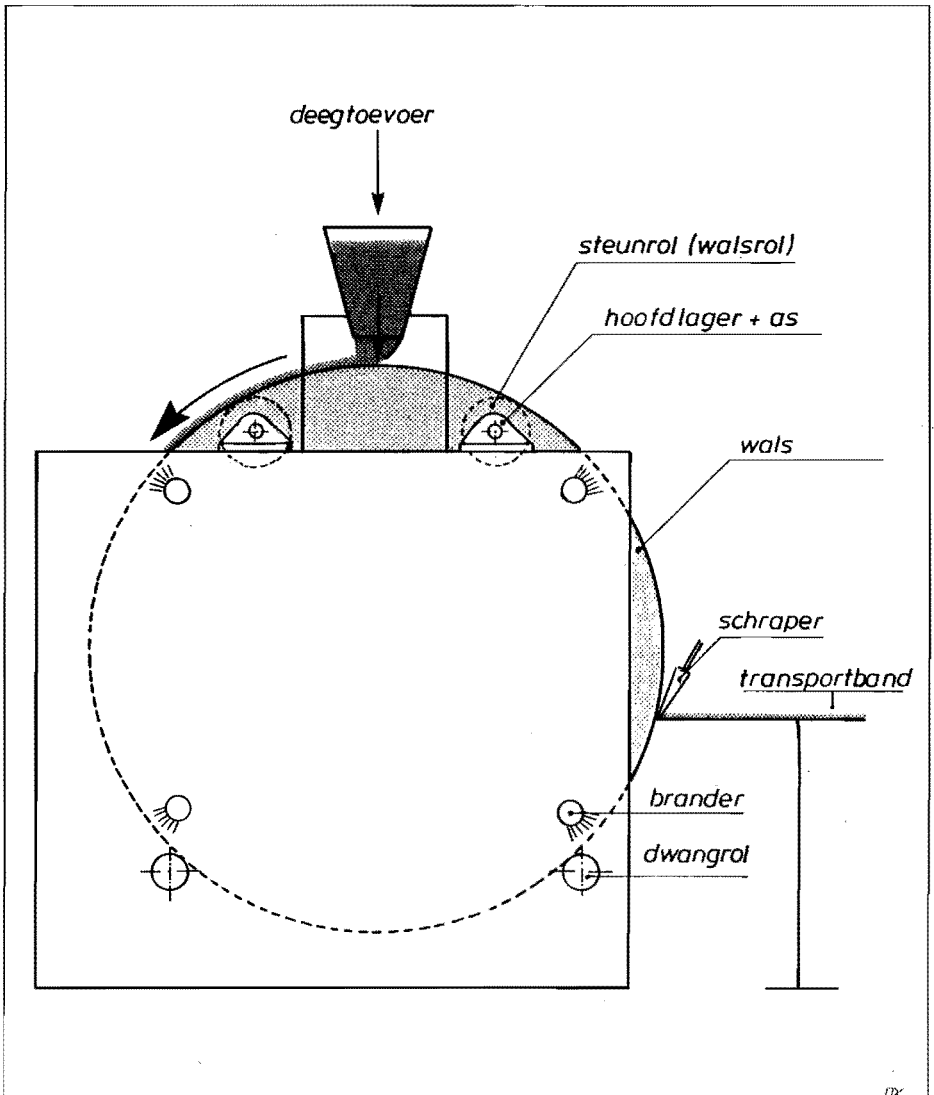
Gedurende de afgelopen jaren zijn de productie activiteiten van Mora aanzienlijk toegenomen. Binnenkort is men van plan definitief over te stappen van een twee-op drieploegendienst.

Een en ander betekent dat de doelmatigheid van het onderhoud een steeds belangrijker rol gaat spelen. Een van de manieren waarop dit gerealiseerd kan worden is het op systematische wijze ontwerpen van onderhoudsconcepten. Een *onderhoudsconcept* voor een machine is de verzameling regels, die voorschrijft welk onderhoud aan die machine wordt uitgevoerd en hoe die uitvoering geactiveerd wordt.

Dit artikel is gebaseerd op een afstudeeronderzoek waarmee de opleiding tot bedrijfskundig ingenieur aan de Technische Universiteit Eindhoven werd afgerond (Gaag¹). De opdracht was het TUE-ontwerpkader voor het onderhoudsconcept (Gits²) bij de Technische Dienst te introduceren en het ontwerpproces aan de hand van een voorbeeld te illustreren.

In overleg met het bedrijf werd de flensenmachine als object van onderzoek gekozen. Van deze machine staan er zes opgesteld informatie over het storingsgedrag is dus op redelijke termijn te verzamelen. Voorts is men van mening deze machi-

nes goed te kennen. Tenslotte speelde mee dat deze machines aan het begin van produktielijnen met een hoge bezettingsgraad staan; stilstand is kostbaar.



Figuur 1. Principeschematische van de flensenmachine

De flensenmachine wordt gebruikt voor het maken van flensen voor loempia's en smulrollen. De machine bestaat uit een grote wals die door vier branders van binnenuit wordt verwarmd. Bovenop de wals loopt door middel van een doseerinstallatie beslag. Dit beslag wordt op de wals gebakken tot een flens die er na 3/4 omwenteling vanaf wordt geschaafd en op een transportbandje naar de volgende bewerking terecht komt.

De 6 flensenmachines die in gebruik zijn bij Mora wijken op onderdelen van elkaar af. De doseercilinders kunnen bijvoorbeeld vast danwel beweegbaar geconstrueerd zijn. Deze verschillen dienen in de uiteindelijke concepten te worden verdisconteerd. In dit artikel wordt hieraan echter geen aandacht besteed.

DAGELIJKS

1. smeren van:

- hoofdlagers
- lagers dwangrollen
- looprollen doseerbak
- lagers transportband
- kettingen en kettingwielen

2. inspectie van:

- meedraaien dwangrollen
- meedraaien looprollen doseerbak

3. inspectie van oliepeil verzorgingseenheid

4. water aftappen luchttoevoer

5. water aftappen reduceer verzorgingseenheid

TWEE WEKELIJKS:

- afluisteren hoofdlagers

TWEE MAANDELIJKS:

- inspecteren gasdrukbewaker

JAARLIJKS:

- revisie

OPPORTUNISTISCH:

- inspecteren aandrijving

BX

Het huidige onderhoud van de flensenmachine (fig. 2) wordt gedomineerd door een jaarlijkse revisie. Deze revisie heeft ten doel de machine in een zodanige staat te brengen dat tussen twee revisies geen storingen optreden. Het uitvoeren van een revisie leidt tot een stilstand van de flensenmachine gedurende 4 à 5 dagen en vergt 125 tot 150 manuren. De activiteiten die deel uitmaken van een revisie zijn niet eenduidig vastgesteld en hangen af van de produktiedruk op het moment van revisie en van de monteurs die de revisie uitvoeren.

Het ontwerpen van een onderhoudsconcept voor de flensenmachine vereist analyse van de machine (paragraaf 2) en van de bedrijfsomstandigheden (paragraaf 3). In de paragrafen 4 t/m 10 worden vervolgens de onderscheiden ontwerpstappen beschreven. Enige afrondende opmerkingen worden in paragraaf 11 gemaakt.

2. Technisch systeem analyse

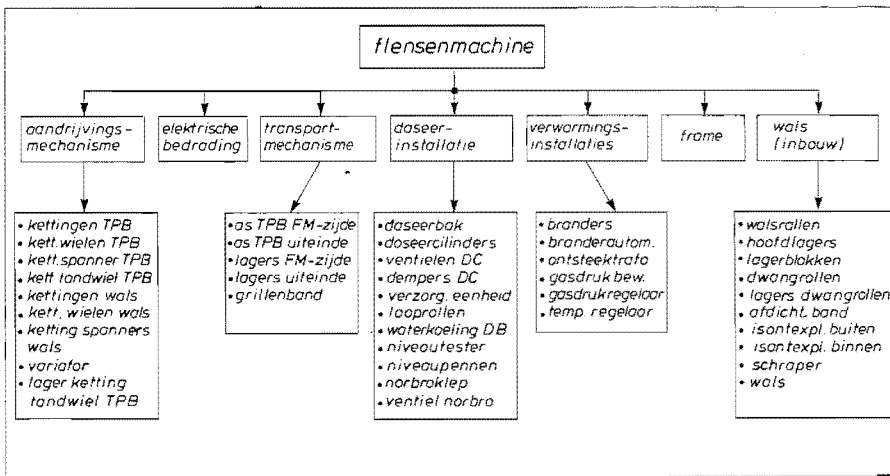
Technisch systeem analyse richt zich op het bepalen van die aspecten van de flensenmachine die de basis voor het onderhoudsconcept vormen. Het gaat daarbij om het definiëren van de storingen en het, per storing, bepalen van het storingsgedrag, de storingsconsequenties en de storingsvorm.

De aanwezige gegevens zijn te summier om als enige bron voor deze analyse te dienen. Veelal moest dan ook gebruik gemaakt worden van de kennis en ervaring van de medewerkers van de Technische Dienst en van Productie. Aanvullend werd de urenverantwoording van de monteurs onderzocht in een poging inzicht te verkrijgen in uitgevoerde werkzaamheden en zodoende in het onderliggende storingsgedrag van de flensenmachine. Tenslotte werd gebruik gemaakt van de revisiecontrolelijsten waarop vermeld staat welke activiteiten tijdens een revisie zijn uitgevoerd en welke materialen daarbij zijn verbruikt. Ook dit geeft aanwijzingen over het storingsgedrag.

In het kader van het *definiëren van storingen* werd de flensenmachine gedecomposeerd in sub-systemen en componenten (fig. 3) Vervolgens werden voor iedere component de mogelijke storingen vastgesteld.

Wellicht ten overvloede wordt opgemerkt dat de storingen, weergegeven in fig. 4, kolom 2, het resultaat zijn van een proces waarbij voortdurend overleg met monteurs heeft plaatsgevonden.

Het volledig *karacteriseren van het storingsgedrag* in statistische termen bleek niet mogelijk, gezien de onvolledigheid van de gegevens. Volstaan werd dan ook met het schatten van het gemiddelde storingsinterval en van het type storingsgraad te weten dalend, constant, of stijgend. Bij het karakteriseren van het storingsgedrag in mechanistische termen is uitgegaan van de in het bedrijf aanwezige tech-



Figuur 3. Decompositie van de flensenmachine

nische mogelijkheden. Voor de storingen ‘vastlopen hoofdlagers’ (nr. 2) en ‘vastlopen variator’ (nr. 22) is er sprake van een meetbare storingvoorspellende grootheid.

Het storingsgedrag is vastgelegd in figuur 4, kolommen 3, 4 en 5.

Een precieze *bepaling van storingsconsequenties* is door gebrek aan gegevens niet mogelijk. Volstaan wordt dan ook met een zeer globale bepaling van het economische gewicht van een storing. Daartoe worden de volgende vijf componenten van storings consequenties onderscheiden:

- ongeplande productieonderbreking;
- kwaliteitsdaling;
- loonkosten;
- materiaalkosten; en
- gevolgschade.

Er is sprake van een ongeplande productieonderbreking indien een storing onmiddellijk stilstand tot gevolg heeft danwel dat dezelfde dag stilstand is vereist. Een ongeplande stilstand van de flensenmachine betekent stilstand van de gehele produktielijn; er zitten dan 5 tot 8 mensen zonder werk. Binnen het bedrijf hecht men zeer aan het voorkomen van ongeplande stilstanden hetgeen wordt vertaald in het zwaar laten meetellen van deze component. De waardering van de onderscheiden componenten is weergegeven in figuur 5. De gehanteerde grenswaarden zijn in onderling overleg tot stand gekomen.

nr	1 <u>component</u>	2 <u>storing</u>	3 gemiddeld storings- interval	4 storings- graad	5 storings- voorspellende grootheid	6 normatief storings- gewicht	7 storings- vorm
1	walsrol	inlopen groef	24 mnd.	stijgend		3	ES
2	hoofdlager	vastlopen	24 mnd.	stijgend	kraken	5	ES
3	lagerblok hoofdlager	speling	>24 mnd.	stijgend		2	VS
4	isontexplaat buiten	vervuilen	24 mnd.	stijgend		1	VS
5	isontexplaat binnen	vervuilen	24 mnd.	stijgend		2	VS
6	dwangrol	groeven	12 mnd.	stijgend		2	ES
7	dwangrol	vervuilen	6 mnd.	stijgend		3	ES
8	lager dwangrol	vastlopen	12 mnd.	stijgend		2	VS
9	wals	slijten oppervlak	>24 mnd.	stijgend		3	ES
10	afdichtingsband	verbranden	2 mnd.	stijgend		2	ES
11	schraper	slijten	12 mnd.	stijgend		2	ES
12	ketting wals	toename lengte	6 mnd.	stijgend		3	ES
13	ketting wals	breken	>24 mnd.	stijgend		5	ES
14	kettingwiel wals	inslijten tanden	24 mnd.	stijgend		3	VS
15	kettingspanner wals	rubber verweerd	12 mnd.	stijgend		2	VS
16	ketting TPB	toename lengte	12 mnd.	stijgend		2	VS
17	ketting TPB	breken	>24 mnd.	stijgend		3	ES
18	kettingwiel TPB	inslijten tanden	>24 mnd.	stijgend		2	VS
19	kettingspanner TPB	rubber verweerd	>24 mnd.	stijgend		1	VS
20	lager kett-tandwiel	vastlopen	12 mnd.	stijgend		3	ES
21	ketting tandwiel	inslijten tanden	>24 mnd.	stijgend		2	VS
22	variator	vastlopen	18 mnd.	stijgend	kraken	7	ES
23	variator	slippen	12 mnd.	stijgend		6	ES
24	as TPB FM - zijde	breken	>24	constant		3	ES
25	as TPB uiteinde	breken	24	constant		3	ES
26	lager TPB FM - zijde	vastlopen	6 mnd.	constant		1	ES
27	lager TPB uiteinde	vastlopen	6 mnd.	?		3	ES
28	grillenband	vervormen/breuk	1 mnd.	constant		2	VS
29	doseerbak	pennen krom	3 mnd.	constant		3	ES
30	doseerbak	slijten	12 mnd.	stijgend		2	ES
31	waterkoeling	lek (water)	6 mnd.	stijgend		1	ES
32	doseercilinder	lek (lucht)	3 mnd.	?		3	ES
33	nobroklep	o-ringetje defekt	24 mnd.	stijgend		2	ES
34	ventiel nobroklep	lek (lucht)	12 mnd.	?		1	ES
35	ventiel doseer cil.	lek (lucht)	6 mnd.	?		2	ES
36	demper doseer cil.	vervuilen	6 mnd.	?		1	ES
37	niveaupen	oxidatie aansluiting	18 mnd.	stijgend		1	ES
38	niveautester	elektrische storing	>24 mnd.	stijgend		0	ES
39	looprol	vastlopen	12 mnd.	stijgend		4	VS
40	verzorgingseenheid	membraam defekt	>24 mnd.	stijgend		2	ES
41	brander	vervuilen door deeg	2 mnd.	constant		3	ES
42	brander	vervuilen door gebruik	6 mnd.	stijgend		1	ES
43	gasdrukbewaker	membraam defekt	>24 mnd.	stijgend		1	VS
44	gasdrukregelaar	trage werking	>24 mnd.	stijgend		3	ES
45	branderautomat	elektrisch defekt	18	constant		1	ES
46	aansteektrafa	elektrisch defekt	12	constant		1	ES
47	temperatuurregelaar	elektrisch defekt	12	constant		4	ES
48	elektrische bedrading	breken/beschadigen	24	?		4	ES
49	frame	roest'visitekaartje'	24	stijgend		1	VS

Figuur 4. De resultaten van het analyseren van de flensmachine

<u>STORINGSCONSEQUENTIE</u>	<u>WEEGFACITOR</u>			
	0	1	2	3
1 ongeplande produktie onderbreking ?	nee	≤15 min	≤60 min	>60 min.
2 kwaliteitsdaling ?	nee	ja	n.v.t.	n.v.t.
3 manuren T.D. ?	≤2 uur	>2 uur	n.v.t.	n.v.t.
4 materiaalkosten ?	≤fl.500,-	>fl.500,-	n.v.t.	n.v.t.
5 schadelijke gevolgen ?	nee	ja	n.v.t.	n.v.t.

Figuur 5. De storingsconsequenties

De berekening van het normatief storingsgewicht wordt geïllustreerd voor de storing 'luchtlek doseercilinder' (nr. 32). Deze storing resulteert in een ongeplande stilstand met een duur variërend van 15 minuten tot 1 uur (waardering: 2), er is sprake van kwaliteitsdaling (waardering: 1), het aantal manuren benodigd voor het opheffen van de storing is minder dan 2 (waardering: 0), de materiaalkosten zijn lager dan f 500,- (waardering: 0) en er is geen gevolgschade (waardering: 0).

Het normatieve storingsgewicht is dus: $2 + 1 + 0 + 0 + 0 = 3$.

Het normatief storingsgewicht van iedere storing is weergegeven in figuur 4, kolom 6.

Het vaststellen van de storingsvorm komt neer op het onderscheiden van evidente en verborgen storingen. Het optreden van een evidente storing blijkt tijdens het gebruik van de machine. Bij een verborgen storing is dit niet het geval en dient een separate detectie activiteit te worden voorgeschreven. Een voorbeeld van een verborgen storing is het 'vervormen grillenband' (nr. 28). Het schoonmaken van de flensenmachine na afloop van produktie kan leiden tot beschadigingen aan de grillenband. De geaccumuleerde beschadiging van de grillenband op een bepaald moment is zonder inspectie niet vast te stellen.

De storingsvorm is te vinden in figuur 4, kolom 7.

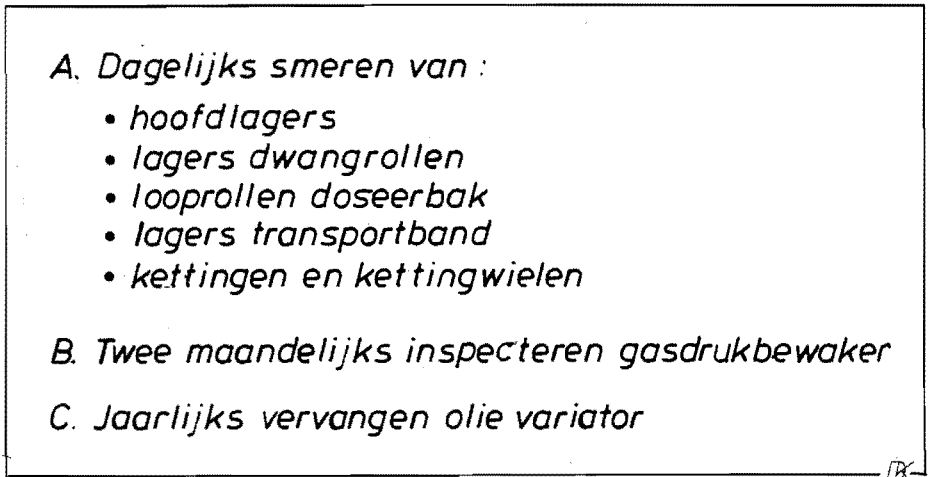
3. Bedrijfsanalyse

Bedrijfsanalyse dient de voorwaarden te identificeren die door het bedrijf aan een onderhoudsconcept voor de flensenmachine worden gesteld.

Deze voorwaarden volgen uit:

- de onderhoudsvoorschriften
- de veiligheid van het produktieproces en omgeving
- de continuïteit van het produktieproces
- de onderhoudsbeheersingswensen en
- de aanwezige onderhoudsmiddelen.

Voor de flensenmachine worden geen *onderhoudsvorschriften* wettelijk voorgeschreven. Door de fabrikant wordt een aantal onderhoudsvorschriften aanbevolen (figuur 6). Deze vorschriften dienen onverkort in het onderhoudsconcept te worden opgenomen.



Figuur 6. Voorschrift van de fabrikant

De *veiligheid van het produktieproces en omgeving* heeft geen aanleiding gegeven tot het van bedrijfswege specificeren van eisen met betrekking tot de betrouwbaarheid van (onderdelen van) de flensenmachine.

De *continuïteit van het produktieproces* speelt een belangrijke rol zoals reeds bij het bepalen van het storingsgewicht (hoofdstuk 2) aan de orde is gesteld. Dit belang leidt allereerst tot een voorkeur voor preventief onderhoud. Voorts dient onderhoud bij voorkeur in de niet-produktieve perioden te worden uitgevoerd. Het produktieprofiel wordt gekenmerkt door een jaarlijkse vakantie waarin onderhoud kan worden uitgevoerd zonder onderbreking van het produktieproces.

De *onderhoudsbeheersing* wenst een eenvoudig concept aangezien de administratieve mogelijkheden nog beperkt zijn.

De *onderhoudsmiddelen* aanwezig in het bedrijf leggen geen specifieke beperkingen op aan het onderhoud dat aan de flensenmachine kan worden uitgevoerd.

4. Het initiëren van onderhoud

Het initiëren van onderhoud is de ontwerpstep waarin aan iedere storing een elementaire onderhoudsregel gekoppeld wordt op grond van potentiële effectiviteit, anticiperend op efficiency-overwegingen en rekening houdend met bedrijfsomstandigheden.

Een *elementaire onderhoudsregel* (EOR) schrijft een specifieke categorie van onderhoudsinitiëring voor.

De drie mogelijke categorieën van onderhoudsinitiëring zijn:

- storingsafhankelijk onderhoud (SAO);
- gebruiksduurafhankelijk onderhoud (GAO) en
- toestandafhankelijk onderhoud (TAO).

Uitgangspunt bij het initiëren van onderhoud voor de flensenmachine is de overweging dat voor verborgen storingen de langere termijn gevolgen beperkt kunnen worden door SAO voor te schrijven waarbij op gezette tijden gekeken wordt of de storing al dan niet is opgetreden. Voorts dat voor evidente storingen met geringe consequenties GAO en TAO niet efficiënt zijn. De benodigde onderhoudsinspanning overtreft in het algemeen de bereikbare reductie in storingsconsequenties.

In overleg werd besloten een normatief storingsgewicht kleiner dan drie als gering aan te merken. De resultaten van het kwalificeren van mogelijke categorieën van onderhoudsinitiëring zijn gepresenteerd in figuur 7.

Indien voor een storing meerdere categorieën mogelijk zijn, moet de uiteindelijke keuze gemaakt worden op grond van efficiency overwegingen. Bedrijfsvoorwaarden spelen bij de flensenmachine in deze ontwerpstep geen rol.

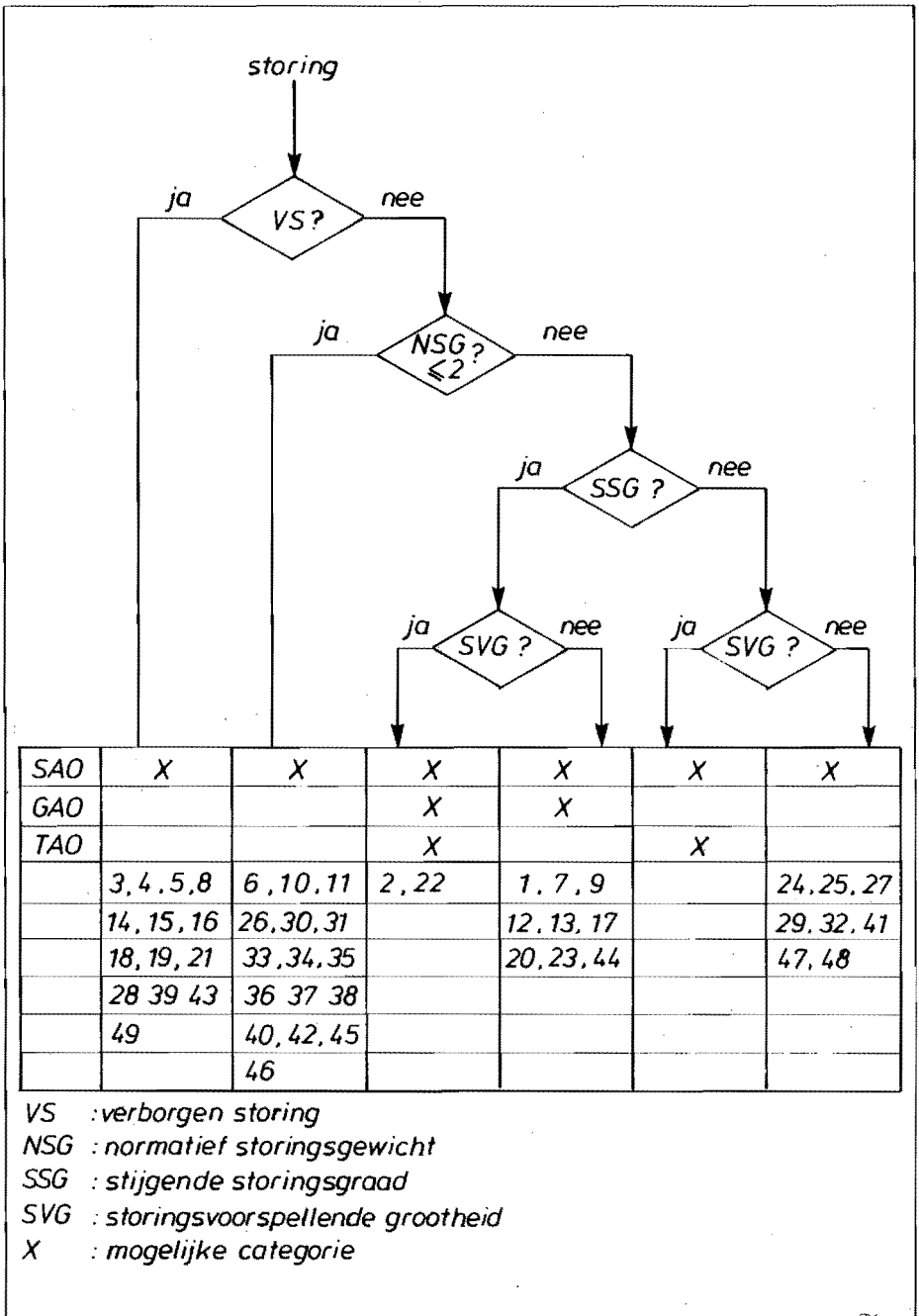
Voor de storingen 'vastlopen hoofdlagers' (nr. 2) en 'vastlopen variator' (nr. 22) zijn alle drie de categorieën mogelijk.

Het vastlopen van een hoofdlager leidt tot een stilstand van 1 dag. Inspectie van de 4 lagers in het kader van TAO neemt zo'n 15 manminuten in beslag. De inspectie dient wel frequent te worden uitgevoerd, tenminste iedere twee weken.

Uitspraken over de efficiëntie van GAO zijn niet mogelijk aangezien de variantie van de storingskansdichtheidsfunctie onbekend is. Afweging van voornoemde aspecten resulteert in kwalificatie van TAO.

TAO in relatie tot het vastlopen van de variator vereist het af luisteren van dit onderdeel wat met veel demontage en montage activiteiten gaat gepaard. Dit af luisteren dient daarenboven met een relatief hoge frequentie te worden uitgevoerd. Over de efficiency van GAO is wederom niets te zeggen door het gebrek aan storingsdata. SAO wordt gekwalificeerd.

Voor een negental storingen dient een keuze gemaakt te worden tussen SAO en GAO. Het storingsinterval bij 'vervuilen dwangrol' (nr. 7) varieert niet veel. De benodigde onderhoudsinspanning is bovendien gering, schoonmaken vergt 5 manminuten. Niets staat de keuze van GAO in de weg. Het 'lengen ketting wals' (nr. 12) vereist spannen/vervangen van de ketting. Deze ingreep vergt veel



Figuur 7. Kwalificatie van de mogelijke categorieën van onderhoudsinitiatieering

demontage en montage activiteiten (werklast: 1 manuur). Men vindt de mogelijke reductie in storingsconsequenties toch opwegen tegen de benodigde extra inspanning en kiest voor GAO. Voor de overige storingen te weten nr's 1, 9, 13, 17, 20, 23 en 44 geldt dat door gebrek aan inzicht in het storingsgedrag, geen uitspraken over de efficiency van GAO mogelijk zijn. SAO wordt dan ook gekwalificeerd.

De volgende ontwerpstappen houden zich bezig met het specificeren van operaties en de wijze van activering van deze operaties. Voor de EOR's 1, 6, 9, 10, 11, 13, 17, 20, 22 t/m 27, 29 t/m 38, 40, 41, 42 en 44 t/m 48 die SAO in relatie tot evidente storingen voorschrijven ligt de activering vast. De reparatie wordt na diagnose van de opgetreden storing bepaald en niet in het onderhoudsconcept gespecificeerd. Deze regels kunnen dus rechtstreeks in de uiteindelijke verzameling onderhoudsregels worden opgenomen.

De overige regels vormen de input voor het operationaliseren van onderhoud.

5. Het operationaliseren van onderhoud

In het operationaliseren van onderhoud worden onderhoudsoperaties aan EOR's gekoppeld op grond van technische effectiviteit, anticiperend op efficiencyoverwegingen en rekening houdend met bedrijfsomstandigheden. Deze ontwerpstep is primair technisch van aard. In de bedrijfskundige context van dit artikel worden alleen de resultaten in de vorm van een verzameling kwalitatieve onderhoudsregels gepresenteerd.

Een *kwalitatieve onderhoudsregel (KOR)* schrijft een specifieke categorie van onderhoudsinitiëring voor in combinatie met een specifieke onderhoudsoperatie.

De EOR's 3, 4, 5, 8, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 28, 39, 43 en 49 schrijven SAO voor in relatie tot verborgen storingen. Deze regels vereisen dus het operationaliseren van inspecties om vast te stellen of de storing al dan niet is opgetreden. De reparatie die volgt indien de storing is opgetreden wordt niet bij voorbaat gespecificeerd maar hangt af van de vigerende omstandigheden op het moment van constatering.

EOR 7 schrijft GAO voor in relatie tot het 'vervuilen dwangrol'. De operatie bestaat dan ook uit schoonmaken. EOR 12 schrijft dezelfde categorie voor met betrekking tot 'lengen ketting wals'. Dit vereist een operatie spannen c. q. vervangen ketting.

EOR 2, tenslotte, schrijft TAO voor gekoppeld aan 'vastlopen hoofdlaters'. De inspectie betreft het af luisteren van de lagers. De eventuele reparatie wordt niet in het onderhoudsconcept gedetailleerd.

Tijdens deze ontwerpstep wordt voor iedere gekwalificeerde operatie de werklast bepaald, het type onderhoud: buitenbedrijf (BB) dan wel tijdens-bedrijf (TB), en eventuele gemeenschappelijke set-up activiteiten.

De uiteindelijke verzameling KOR's is in figuur 8 weergegeven.

De volgende ontwerpstappen houden zich bezig met het kwantificeren van onderhoudsintervallen. Indachtig de gewenste eenvoud wordt voor de flensen-machine afgezien van opportunistisch onderhoud. De volledige verzameling KOR's wordt onderworpen aan het limiteren van onderhoudsintervallen.

nr.	<u>component</u>	<u>storing</u>	<u>EOR</u>	<u>operatie</u>	werklast [mon min.]	onderhouds type	set up type
2	hoofd lager	vastlopen	TAO	afluisteren	15	TB	
3	hoofdlagerblok	speling	SAO	inspecteren	10	BB	
4	isontexplaat buiten	vervuilen	SAO	inspecteren	5	TB	
5	isontexplaat binnen	vervuilen	SAO	inspecteren	10	TB	
7	dwangrol	vervuilen	GAO	schoonmaken	30	BB	
8	lager dwangrol	vastlopen	GAO	inspecteren	1	BB	
12	ketting wals	lengte	SAO	spannen/vervangen	30	BB	A
14	kettingwiel wals	inslijten tanden	SAO	inspecteren	5	TB	
15	kettingspanner wals	verweren rubber	SAO	inspecteren	5	BB	A
16	ketting TPB	lengte	SAO	inspecteren	15	BB	
18	kettingwiel TPB	inslijten tanden	SAO	inspecteren	5	TB	
19	kettingspanner TPB	verweren rubber	SAO	inspecteren	5	BB	
21	ketting tandwiel	inslijten tanden	SAO	inspecteren	10	TB	
28	grillenband	vervormen/breken	SAO	inspecteren	1	BB	
39	laoprol	vastlopen	SAO	inspecteren	1	BB	
43	gasdrukbewaker	membraam defekt	SAO	inspecteren	5	BB	
49	frame	roestvorming	SAO	inspecteren	10	TB	

Figuur 8. Verzameling kwalitatieve onderhoudsregels

6. Het limiteren van onderhoudsintervallen

Het limiteren van onderhoudsintervallen is de ontwerpstep waarin de verzameling te kwantificeren KOR's wordt omgezet in een verzameling limitatieve onderhoudsregels.

Een *limitatieve onderhoudsregel (LOR)* schrijft een onderhoudsoperatie voor en het maximale interval waarmee uitvoering van die operatie kan worden geactiveerd.

Het limiteren richt zich op het bepalen van dit maximale interval op basis van elementaire efficiency, rekening houdend met bedrijfsomstandigheden. Het betreft het interval van:

- inspectie bij SAO in relatie tot een verborgen storing
- reparatie bij GAO en
- inspectie bij TAO.

Het ontbreken van voldoende gegevens over het storingsgedrag van de flensen-

machine maakt het onmogelijk de intervallen op een objectieve wijze vast te stellen. Het limiteren van onderhoudsintervallen werd dan ook volledig gebaseerd op schattingen van medewerkers van de Technische Dienst en van Productie. De vaststelling van het interval van inspectie in geval van SAO vereist afweging van de inspectieve inspanning tegen de mogelijke storingsconsequenties op langere termijn.

De werkwijze wordt aan de hand van twee voorbeelden toegelicht

Het 'vervuilen/losraken isontex plaat buitenzijde' (nr. 4) heeft versnelde slijtage van de hoofdlagers tot gevolg, hetgeen zoveel mogelijk voorkomen dient te worden. De inspectie van de plaat vereist een geringe inspanning (werklast: 5 manminuten). Beide aspecten afgewend wordt tot een limitatief interval van 1 maand besloten.

De consequenties van 'roestvorming frame' (nr. 49) zijn zeer gering. Bovendien betreft het een zeer geleidelijk proces. Puur op esthetische overwegingen wordt gekozen voor een interval van 2 jaar.

Het interval van reparatie in geval van GAO wordt bepaald door het gemiddelde storingsinterval, de spreiding rond dit gemiddelde en de storingsconsequenties. Voor het 'vervuilen dwangrol' (nr. 7) is het gemiddeld storingsinterval geschat op 6 maanden. Naast de in het normatieve storingsgewicht verwerkte aspecten speelt ook de mate van vervuiling een rol. Indachtig de benodigde onderhoudsinspanning van 30 manminuten en ervan uitgaande dat de mate van vervuiling tot 4 maanden geen problemen oplevert wordt het limitatieve interval op 4 maanden bepaald.

Het 'lengen ketting wals' (nr. 12) resulteert in de noodzaak de ketting te spannen danwel te vervangen. Men verwacht dat er tot 6 maanden geen problemen optreden. Gezien de benodigde demontage en montage activiteiten (werklast: 60 manminuten) wordt tot een limitatief interval van 6 maanden besloten.

Bij het limiteren van het interval van inspectie is het verloop van de storingvoorspellende grootheid van doorslaggevend belang. Bij de flensenmachine is voor één storing voor TAO gekozen: 'vastlopen hoofdlagers' (nr. 2). Het verloop van de storingvoorspellende grootheid is niet bekend. Met het aanwezige inzicht verwacht men een voorspellingstermijn van 2 weken te kunnen realiseren d.w.z. na een inspectie kan met grote zekerheid gezegd worden of het lager nog twee weken zal meegaan. Het limitatieve interval wordt dan ook 2 weken.

Het limiteren van onderhoudsintervallen resulteert in de verzameling LOR's zoals weergegeven in figuur 9.

In de volgende ontwerpstappen wordt aandacht besteed aan het combineren van onderhoudsregels ten einde de economische en organisatorische afhankelijkheden tussen de regels te verdisconteren.

Dit vereist aandacht voor de combineerbaarheid van de LOR's. Nadere techni-

<i>nr</i>	<i>component</i>	<i>storing</i>	<i>operatie</i>	<i>limitatief onderhouds interval</i>
2	hoofdlager	vastlopen	afluisteren	2 weken
3	hoofdlager blok	speling	inspecteren	2 mnd
4	isontexplaat buiten	vervuilen	inspecteren	1 mnd
5	isontexplaat binnen	vervuilen	inspecteren	12 mnd
7	dwangrol	vervuilen	schoonmaken	4 mnd
8	lager dwangrol	vastlopen	inspecteren	1 dag
12	ketting wals	lengen	spannen/vervangen	6 mnd
14	kettingwiel wals	inslijten tanden	inspecteren	6 mnd
15	kettingspanner wals	verweren rubber	inspecteren	6 mnd
16	ketting TPB	lengen	inspecteren	6 mnd
18	kettingwiel TPB	inslijten tanden	inspecteren	6 mnd
19	kettingspanner TPB	verweren rubber	inspecteren	6 mnd
21	ketting tandwiel	inslijten tanden	inspecteren	6 mnd
28	grillenband	vervormen/breken	inspecteren	1 dag
39	looprol	vastlopen	inspecteren	1 dag
43	gasdrukbewaker	membraam defekt	inspecteren	2 mnd
49	frame	roestvorming	inspecteren	24 mnd

Figuur 9. Verzameling limitatieve onderhoudsregels

sche en economische beschouwing van deze regels, indachtig de gewenste eenvoud, leidt er toe alle regels als combineerbaar te beschouwen.

De totale verzameling LOR's vormt dus de input van het clusteren van onderhoudsoperaties.

7. Het clusteren van onderhoudsoperaties

Het clusteren van onderhoudsoperaties beoogt individuele onderhoudsoperaties, zoals voorgeschreven door de verzameling LOR's, samen te voegen op grond van combinatorische efficiency en rekening houdend met bedrijfsomstandigheden.

Deze ontwerpstep resulteert in een verzameling normatieve onderhoudsregels. Een *normatieve onderhoudsregel (NOR)* schrijft een onderhoudsoperatie dan wel onderhoudscluster voor en het maximale interval waarmee uitvoering geactiveerd kan worden. Een *onderhoudscluster* is een verzameling operaties met een gemeenschappelijke set-up.

De bedrijfsomstandigheden bestaan uit de voorschriften van de fabrikant (figuur 10). Deze voorschriften worden aan de verzameling LOR's toegevoegd als LOR's 50 t/m 57. Hierbij dient te worden aangetekend dat LOR 43 en LOR 56 identiek zijn. LOR 56 wordt in het verdere ontwerpproces niet meegenomen.

nr.	<u>component</u>	<u>operatie</u>	limitatief onderhouds interval	werklast [man min.]	onderhouds type	set up type
50	hoofdlagers	smeren	1 dag	1	BB	B
51	lagers dwangrollen	smeren	1 dag	1	BB	B
52	looprollen doseerbak	smeren	1 dag	1	BB	B
53	lagers transportband	smeren	1 dag	1	BB	B
54	kettingen wals	smeren	1 dag	1	BB	B
55	ketting transportband	smeren	1 dag	1	BB	B
56	gasdrukbewaker	inspecteren	2 mnd.	5	BB	
57	variator	olie verversen	12 mnd.	20	BB	A

Figuur 10. Voorschriften van de fabrikant

Het clusteren van onderhoudsoperaties heeft betrekking op operaties die set ups gemeen hebben. De LOR's die operaties voorschrijven die geen set ups gemeenschappelijk hebben worden rechtstreeks in de verzameling NOR's opgenomen. De resterende regels worden in sets clusterbare LOR's opgesplitst op grond van identieke set-ups.

Voor de flensenmachine kunnen twee typen gemeenschappelijke set-ups onderscheiden worden te weten:

- set-up A (werklast: 60 manminuten),
de activiteiten benodigd voor de demontage/montage van de omplating en
- set-up B (werklast: 10 manminuten),
de activiteiten die bij het smeren worden uitgevoerd.

Voor de set clusterbare LOR's die set-up A gemeen hebben (fig. 11. a) geldt dat de operaties O₁₂ en O₁₅ met eenzelfde limitatief interval worden voorgeschreven. Deze operaties worden dus tot een cluster samengevoegd.

nr.	<u>component</u>	<u>operatie</u>	limitatief onderhouds interval
50	hoofdlagers	smeren	1 dag
51	lagers dwangrollen	smeren	1 dag
52	looprollen doseerbak	smeren	1 dag
53	lagers transportband	smeren	1 dag
54	kettingen wals	smeren	1 dag
55	ketting transportband	smeren	1 dag

Figuur 11a. Gemeenschappelijke set-up A

Blijft over de vraag of operatie O₅₇ met dit cluster zal worden samengevoegd.

Het afzonderlijk uitvoeren van O₅₇ vergt:

$$2 \times \{(60) + (30 + 4)\} + 60 + 20 = 270 \text{ manminuten/jaar}$$

Indien O₅₇ samengevoegd wordt met O₁₂ en O₁₅ tot één cluster, vergt de uitvoering een inspanning van:

$$2 \times \{(60) + (30 + 4 + 20)\} = 230 \text{ [manminuten/jaar]}$$

Het samenvoegen van O₅₇ met cluster (O₁₂, O₁₅) levert dus 40 manminuten/jaar op. Echter, men vindt het vanuit technisch oogpunt niet zinvol de olie van de variator (O₅₇ al na een half jaar te vervangen. Daarenboven kan de tijd-winst als gevolg van het gezamenlijk uitvoeren van cluster (O₁₂, O₁₅) en O₅₇ ook behaald worden door in de beheersing rekening te houden met de identieke set ups. Op grond van voornoemde overwegingen werd besloten O₅₇ niet met O₁₂ en O₁₅ samen te voegen tot een cluster.

<i>nr.</i>	<i>component</i>	<i>operatie</i>	<i>limitatief onderhouds interval</i>	<i>werklast [man min.]</i>
12	<i>ketting wals</i>	<i>spannen/vervangen</i>	<i>6 mnd.</i>	<i>30</i>
15	<i>kettingspanner wals</i>	<i>inspecteren</i>	<i>6 mnd.</i>	<i>5</i>
57	<i>variator</i>	<i>olie verversen</i>	<i>12 mnd.</i>	<i>20</i>

Figuur 11b. Gemeenschappelijke set-up B

Voor de set clusterbare LOR's die set-up B gemeen hebben (fig. 11. b) geldt dat alle operaties met hetzelfde limitatieve interval worden voorgeschreven. Deze operaties worden dan ook als één cluster beschouwd.

De uiteindelijke verzameling NOR's is weergegeven in figuur 12.

De volgende stappen in het ontwerpproces hebben betrekking op het structureren van het onderhoud zoals dat voortvloeit uit de verzameling NOR's.

Het bedrijf legt geen stringentere voorwaarden op aan deze structuur anders dan dat eenvoud van de beheersing op prijs wordt gesteld.

Het structureren van de NOR's die buiten-bedrijf-onderhoud voorschrijven begint met het afzonderen van het dagelijks onderhoud. Dit routine onderhoud wordt rechtstreeks in de verzameling onderhoudsregels opgenomen. De resterende NOR's vormen de basis voor de volgende ontwerpstep, het harmoniseren van onderhoudsintervallen.

<i>nr.</i>	<i>component</i>	<i>operatie</i>	<i>normatief onderhouds interval</i>
2	<i>hoofdlager</i>	<i>afluisteren</i>	<i>2 weken</i>
4	<i>isontexplaat buiten</i>	<i>inspecteren</i>	<i>1 mnd.</i>
14	<i>kettingwiel wals</i>	<i>inspecteren</i>	<i>6 mnd.</i>
18	<i>kettingwiel TPB</i>	<i>inspecteren</i>	<i>6 mnd.</i>
21	<i>ketting tandwiel</i>	<i>inspecteren</i>	<i>6 mnd.</i>
5	<i>isontexplaat binnen</i>	<i>inspecteren</i>	<i>12 mnd.</i>
49	<i>frame</i>	<i>inspecteren</i>	<i>24 mnd.</i>

Figuur 12a. Tijdens-bedrijf-onderhoud (TB)

<i>no</i>	<u><i>component</i></u>	<u><i>operatie</i></u>	<i>cluster</i>	<i>normatief onderhouds interval</i>
50	<i>hoofdlagers</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
51	<i>lagers dwangrollen</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
52	<i>looprollen doseerbak</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
53	<i>lagers transportband</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
54	<i>kettingen wals</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
55	<i>ketting transportband</i>	<i>smeren</i>	<i>C1</i>	<i>1 dag</i>
8	<i>lager dwangrol</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>1 dag</i>
28	<i>grillenband</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>1 dag</i>
39	<i>looprol</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>1 dag</i>
3	<i>hoofdlagerblok</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>2 mnd.</i>
43	<i>gasdrukbewaker</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>2 mnd.</i>
7	<i>dwangrol</i>	<i>schönmaken</i>	—	<i>4 mnd.</i>
12	<i>ketting wals</i>	<i>spannen/vervangen</i>	<i>C2</i>	<i>6 mnd.</i>
15	<i>kettingspanner wals</i>	<i>inspecteren</i>	<i>C2</i>	<i>6 mnd.</i>
16	<i>ketting TPB</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>6 mnd.</i>
19	<i>kettingspanner TPB</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>6 mnd.</i>
57	<i>variator</i>	<i>olie verversen</i>	—	<i>12 mnd.</i>

Figuur 12b. Buiten-bedrijf-onderhoud (BB)

8. Het harmoniseren van onderhoudsintervallen

Het harmoniseren van onderhoudsintervallen is de ontwerpstep waarin de normatieve onderhoudsintervallen, zoals voorgeschreven door de verzameling NOR's efficiënt aangepast worden aan de bedrijfsvoorwaarden met betrekking tot toegestane onderhoudsintervallen. Het resultaat is een verzameling formatieve onderhoudsregels.

Een *formatieve onderhoudsregel* schrijft een onderhoudsoperatie dan wel een onderhoudspakket voor en het maximale interval waarmee uitvoering geactiveerd kan worden.

Een *onderhoudspakket* is een verzameling operaties en clusters die met eenzelfde interval wordt voorgeschreven.

Voor de flensenmachine gelden geen voorwaarden met betrekking tot toegestane intervallen.

Het harmoniseren van de deelverzameling NOR's die buiten-bedrijf-onderhoud voorschrijft leidt dan ook niet tot aanpassing van de normatieve onderhoudsintervallen, die gekarakteriseerd worden door een cyclische structuur met periode: 1 maand en cyclus: 12 maanden.

Bij de NOR's die tijdens-bedrijf-onderhoud voorschrijven (periode: 2 weken, cyclus: 24 maanden) richt de aandacht zich het normatieve interval waarmee operatie O₄₉, inspectie frame, wordt voorgeschreven. Het terug brengen van dit interval naar 12 maanden vereenvoudigt de onderhoudsbeheersing aangezien de cyclus wordt gehalveerd en een separate onderhoudsregel verdwijnt. De 10 man-minuten per jaar die dit extra vergt worden acceptabel gevonden.

De verzameling FOR's voor de flensenmachine is geïllustreerd in figuur 13.

<i>nr</i>	<u><i>component</i></u>	<u><i>operatie</i></u>	<i>pakket</i>	<i>formatief onderhouds-</i>
2	<i>hoofdlager</i>	<i>afluisteren</i>	—	2 weken
4	<i>isontexplaat buiten</i>	<i>inspecteren</i>	—	1 mnd.
14	<i>kettingwiel wals</i>	<i>inspecteren</i>	P1	6 mnd.
18	<i>kettingwiel TPB</i>	<i>inspecteren</i>	P1	6 mnd.
21	<i>ketting tandwiel</i>	<i>inspecteren</i>	P1	6 mnd.
5	<i>isontexplaat binnen</i>	<i>inspecteren</i>	P2	12 mnd.
49	<i>frame</i>	<i>inspecteren</i>	P2	12 mnd.

Figuur 13a. Tijdens-bedrijf-onderhoud

<i>nr.</i>	<i>component</i>	<i>operatie</i>	<i>cluster</i>	<i>pakket</i>	<i>formatief onderhouds- interval</i>
3	<i>hoofdlagerblok</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>P3</i>	<i>2 mnd.</i>
43	<i>gasdrukbewaker</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>P3</i>	<i>2 mnd.</i>
7	<i>dwangrol</i>	<i>schoonmaken</i>	—	—	<i>4 mnd.</i>
12	<i>ketting wals</i>	<i>spannen/vervangen</i>	<i>C2</i>	<i>P4</i>	<i>6 mnd.</i>
15	<i>kettingspanner wals</i>	<i>inspecteren</i>	<i>C2</i>	<i>P4</i>	<i>6 mnd.</i>
16	<i>ketting TPB</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>P4</i>	<i>6 mnd.</i>
19	<i>kettingspanner TPB</i>	<i>inspecteren</i>	—	<i>P4</i>	<i>6 mnd.</i>
57	<i>variator</i>	<i>olie verversen</i>	—	—	<i>12 mnd.</i>

Figuur 13b. Buiten-bedrijf-onderhoud

De volgende stap in het ontwerpproces richt zich op het reguleren van de inhoud van onderhoudsbeurten. Voor het tijdens-bedrijf-onderhoud wordt reguleren niet nodig geacht. Deze deelverzameling FOR's wordt rechtstreeks in de set onderhoudsregels opgenomen. De deelverzameling FOR's die buiten-bedrijf-onderhoud voorschrijft vormt de basis voor het groeperen van onderhoudsoperaties.

9. Het groeperen van onderhoudsoperaties

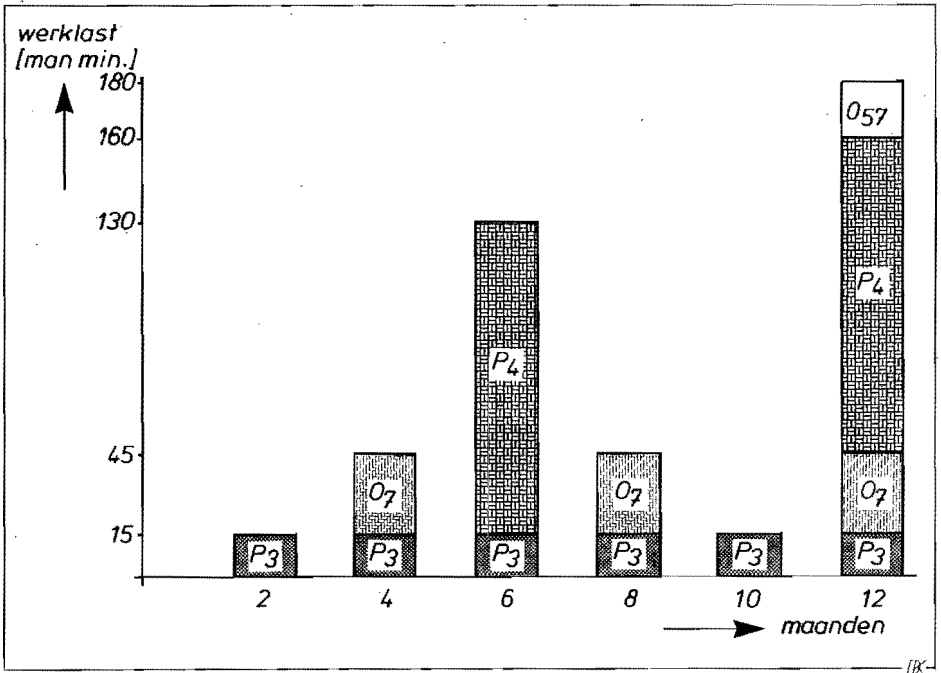
Het groeperen van onderhoudsoperaties beoogt de onderhoudsoperaties, zoals voorgeschreven door de verzameling FOR's, efficiënt onder te brengen in onderhoudsbeurten die voldoen aan de bedrijfsvoorwaarden.

Een *onderhoudsbeurt* is een verzameling onderhoudsoperaties en clusters waarvan de uitvoering als een entiteit wordt geactiveerd.

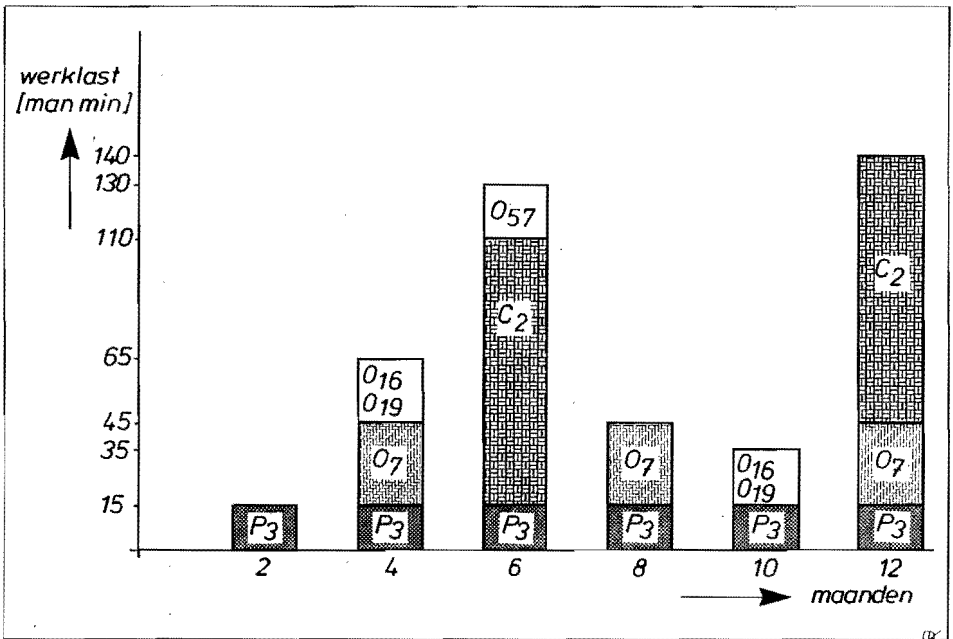
Voor de flensenmachine wordt gestreefd naar een zo gelijkmatig mogelijke werklust per beurt. De verzameling FOR's resulteert in eerste instantie in de onderhoudsbeurten gepresenteerd in figuur 14 a.

De mogelijkheden om de werklust te reguleren zijn beperkt. Pakket P3 en operatie O7 bieden geen mogelijkheden. In pakket P4 moet cluster C2 in stand blijven gezien de set-up van 60 manminuten. Deze set-up maakt de combinatie C2 en O57 ook voordelig. Resteren O16 en O19 om mee te schuiven.

Op grond van deze overwegingen resulteert het reguleren van de werklust in de onderhoudsbeurten zoals geïllustreerd in figuur 14 b.



Figuur 14a. De initiële werklast



Figuur 14b. De geëgaliseerde werklast

Het groeperen van onderhoudsoperaties impliceert een eenmalig verlies van 20 manminuten op een inspanning van 460 manminuten per jaar. Dit verlies werd acceptabel geacht.

Het verder opsplitsen van de onderhoudsbeurten houdt in dat de periodiciteit wordt verhoogd tot bijvoorbeeld 1 maand en vereist dus het scheppen van additionele produktieonderbrekingen. Verder onderzoek in deze richting werd niet opportuun geacht. Het resultaat van het groeperen van onderhoudsoperaties completeert dan ook de verzameling onderhoudsregels voor de flensenmachine.

In de laatste ontwerpstep wordt de gegenereerde verzameling onderhoudsregels vergeleken met de huidige wijze van onderhouden.

10. Het evalueren van onderhoudsregels

Het evalueren van onderhoudsregels is de ontwerpstep waarin de verzameling onderhoudsregels geïdentificeerd wordt die het onderhoudsconcept zal vormen. Voor de flensenmachine komt dit in eerste instantie neer op het vergelijken van de bestaande wijze van onderhouden (figuur 2) met de gegenereerde verzameling onderhoudsregels (zie figuur 15).

De essentiële verschillen tussen beide alternatieven betreffen

- het vervallen van de revisie en
- de toename van het inspectieve onderhoud.

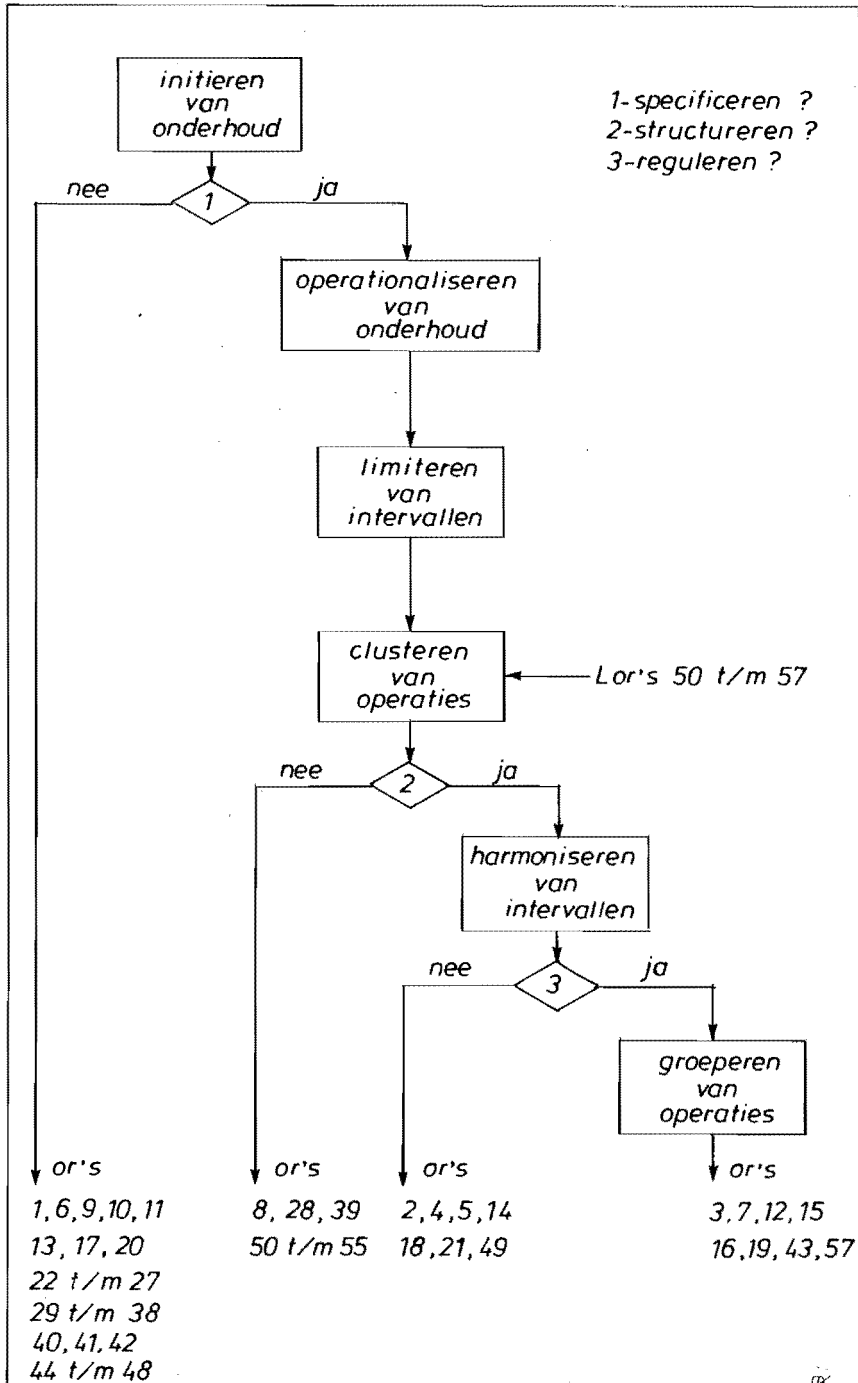
De constatering dat de revisie komt te vervallen is minder verrassend dan op het eerste gezicht lijkt. Twijfels over de zin van revisies in het algemeen bestaan al lang (Hussey/Thomas³).

De zin van de jaarlijkse revisie van de flensenmachine was binnen het bedrijf al onderwerp van gesprek. Herhaaldelijk werd namelijk de termijn van één jaar onder druk van produktie overschreden zonder dat dit tot merkbare veranderingen in het storingsgedrag leidde. (N.B. een machine functioneerde op het moment van schrijven 2 1/2 jaar zonder revisie en zonder merkbare verandering in storingsgedrag).

Het vervallen van de revisie wordt gecompenseerd door een toename van het aantal inspecties.

De huidige wijze van onderhouden vergt een onderhoudsinspanning van 100 tot 125 manuur per jaar. De gegenereerde verzameling onderhoudsregels schrijft operaties voor die 20 manuur per jaar vragen. Dit betekent dat voor het uitvoeren van onderhoud, geactiveerd door storingen en inspecties, 80 manuur per jaar gependend kan worden zonder dat de totale inspanning de huidige overtreft.

De revisie vergt een aaneengesloten stilstand van de flensenmachine van 4 tot 5



Figuur 15. Gegeneerde verzameling onderhoudsregels

dagen. Uitvoering van deze revisie dient in de jaarlijkse vakantie te gebeuren. Vaak is dit niet mogelijk en leidt de vereiste stilstand van de flensenmachine tot produktieonderbreking. De gegenereerde verzameling onderhoudsregels vergt, afgezien van het dagelijks onderhoud, 6 stilstanden per jaar met een totale duur van zo'n 6 uur. Over de stilstand benodigd voor het uitvoeren van onderhoud, geactiveerd door storingen en inspecties, is niets met zekerheid te zeggen. Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat dit meer zal zijn dan de huidige stilstand aangezien uitvoering goeddeels in niet produktieve periodes gepland kan worden.

Samenvattend kan worden gesteld dat de gegenereerde set onderhoudsregels in vergelijking met de huidige wijze van onderhouden zal leiden tot:

- een betere benutting van het gebruikspotentieel
- het slechts uitvoeren van effectief onderhoud en
- een vermindering van de onderhoudskosten.

11. Slotopmerkingen

Het onderzoek heeft uitgewezen dat het toepassen van het ontwerp kader leidt tot een verzameling onderhoudsregels die aanzienlijk afwijkt van de gehanteerde regels: de revisie ontbreekt en het aantal inspecties neemt toe.

Het is aannemelijk gemaakt dat de gegenereerde verzameling de voorkeur geniet boven de huidige wijze van onderhouden. Een kwantitatieve onderbouwing van deze voorkeur is door gebrek aan gegevens niet mogelijk. Een eenvoudig systeem voor de registratie van de benodigde data is opgezet.

Een eerste stap in de richting van de invoering van een onderhoudsconcept voor de flensenmachine zonder revisies kan bestaan uit het systematisch verlengen van het revisie interval. Bij elke revisie dient dan gezocht te worden naar aanwijzingen die duiden op veroudering.

Literatuur

1. Gaag, van der, M. C. A., *Introductie van het onderhoudsconcept bij Mora Snacks*, Afstudeerverslag, Technische Universiteit Eindhoven, 1988.
2. Gits, C. W., *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept: een kader*. In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Hoofdstuk D3010. Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987.
3. Hussey, P. A. and Thomas, S. G., *Are scheduled overhauls necessary?*. SAE-National Aeronautic and Space Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, October 4-9, 1964.

Invoering van een storingsregistratiesysteem

27

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. G.H.V.M. Delahay en samengevat en bewerkt door ir. H.H. Martin

In dit artikel wordt een beschrijving gegeven van de invoering van een storingsregistratiesysteem bij een glasfabriek.

Het storingsregistratiesysteem dat inmiddels grotendeels is ingevoerd levert een belangrijke bijdrage aan het systematisch ontwerpen van onderhoudsconcepten. Het onderzoek dat aan deze invoering vooraf ging heeft aangetoond dat door de grote (technologische) complexiteit van de fabricageprocessen een ruime aandacht voor de optredende storingen noodzakelijk is.

Om het storingsgedrag en de storingsoorzaken beter te kunnen analyseren is er een storingsregistratiesysteem opgezet. De gegevens die uit dit registratiesysteem volgen kunnen worden gebruikt, om op verantwoorde wijze onderhoudsregels op te stellen of bestaande regels te toetsen. Daarnaast verkrijgt men meer inzicht in de beheersing van het fabricageproces ten behoeve van de kwaliteitsverbetering.

1. Inleiding

– Het bedrijf

Het bedrijf is een internationaal concern, met het hoofdkantoor in Zweden, dat zich toelegt op het maken van verpakkingen voor dranken, voedsel, chemische stoffen, medicijnen, cosmetica, enz.

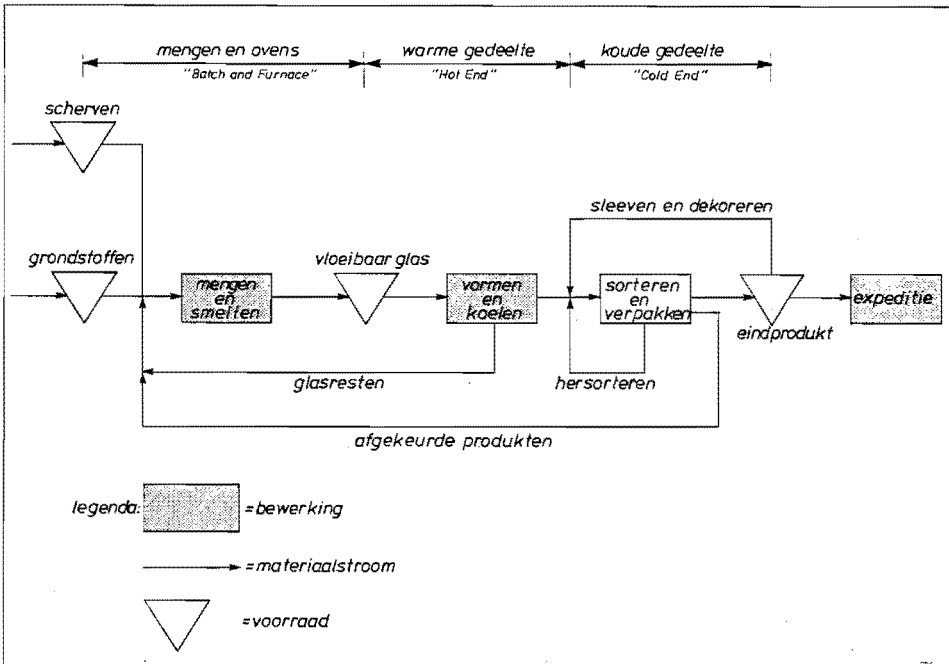
In 1989 telde deze glasindustrie 525 werknemers en een omzet van circa 120 miljoen gulden per jaar door verkoop en productie van zogenoemd verpakkingsglas verdeeld over circa 120 eindprodukten.

De markt voor verpakkingsglas is de laatste tijd erg in opkomst, aangezien glas kan worden gerecycled, in tegenstelling tot vele plastic-verpakkingsprodukten, en is daardoor milieu-vriendelijker.

Voor het bedrijf zijn dan ook de (lange termijn) marktverwachtingen gunstig en uitbreiding van de productie-capaciteit is gepland.

– Het fabricageproces

De fabricage van verpakkingsglas verloopt in een continu proces het gehele jaar door zonder onderbreking. Schematisch verloopt de fabricage zoals is geschetst in figuur 1.



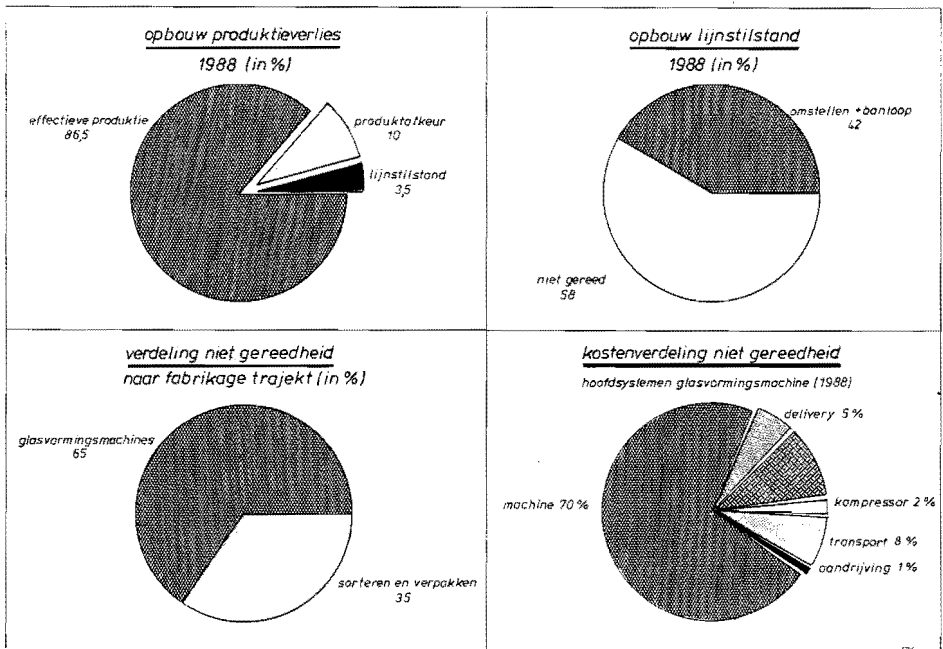
Figuur 1. Een schematisch overzicht van het fabricageproces.

In dit fabricageproces kunnen achtereenvolgens drie hoofdbewerkingen worden onderscheiden, te weten:

- de fabricage van vloeibaar glas (mengers en ovens)
- de fabricage van de gewenste glasvorm (glaspersmachine)
- sorteren en verpakken.

Uit het oogpunt van de procesbeheersing is het glasvormingsproces het meest kritiek. Het gesmolten glas moet bij een hoge temperatuur (soms in meerdere stappen) naar de gewenste eindvorm worden gebracht. Ogenschoonlijk kleine procesverstoringen leiden al snel tot produktafkeur of lijnstilstand.

Hieronder is een beeld geschetst van de productievolumes en de verliezen naar oorzaak. Zoals in deze figuur 2 is te zien zijn lijnstilstand en produktafkeur de hoofdoorzaken van productie-verlies.



Figuur 2. Productieverlies naar oorzaak en relatief belang.

Een verdere opsplitsing laat zien dat de glasvormingsmachine, en het vormgedeelte in het bijzonder, voor het merendeel de oorzaak is voor de nietgereedheid resulterend in een lijnstilstand.

In figuur 3 wordt getoond een schematische fysieke decompositie van een glasvormingsmachine. Opvallend aan de structuur van dit technisch systeem (TS) is dat elke 'module' als rotatiedeel is uitgevoerd.

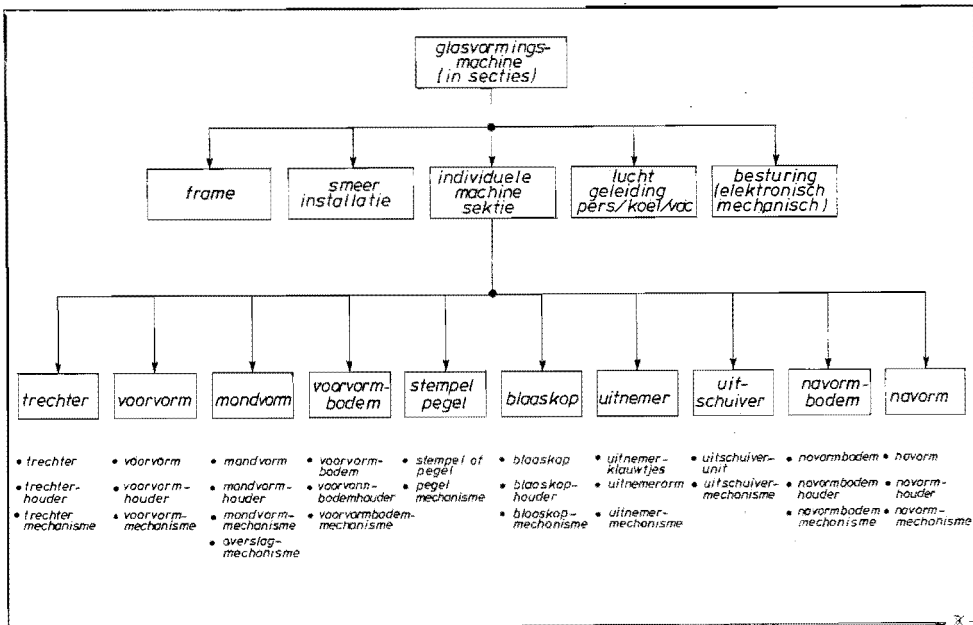
Treedt een storing op aan de glasvormingsmachine dan wordt het vermeende storingsveroorzakende rotatiedeel uitgebouwd en vervangen door een reeds op voorraad gereed liggend rotatiedeel van hetzelfde type.

Op deze wijze wordt het productieproces slechts in geringe mate verstoord en het 'defekte' rotatiedeel kan in de desbetreffende onderhoudswerkplaats worden geïnspecteerd en eventueel gerepareerd.

– *De onderhoudsorganisatie*

De onderhoudsorganisatie is opgebouwd uit hoofdzakelijk procesgeoriënteerde afdelingen:

- algemeen technisch onderhoud (bouwkundig)
- ovens en gemengd onderhoud (divers)
- Cold End onderhoud (divers)
- elektotechnische dienst (elektrotechnisch)



Figuur 3. De schematische fysieke opbouw van een glasvormingsmachine

- vormen onderhoud (specialistisch, materiaalkundig)
- Hot End machine onderhoud (mechanisch, pneumatisch).

Kennis en vaardigheden van de operators en de onderhoudsmonteurs van de glasvormingsmachines ('Hot End') bepalen in hoge mate de hoeveelheid en de kwaliteit van de eindprodukten. Zoals ook in figuur 2 is te zien treedt het grootste gedeelte van de (ongeplande) lijnstilstand op bij de glasvormingsmachines uit het 'Hot End' gedeelte.

Organisatorisch zijn met het onderhoud aan dit gedeelte van het fabricageproces belast de afdelingen 'Hot End machine onderhoud' en 'Vormen Onderhoud'.

2. De onderzoeksprobleemstelling

De directie van het bedrijf is over het geheel genomen tevreden met de gerealiseerde productievolumen. Om economische redenen - meer productie kan ook verkocht worden - blijft het echter interessant om een verdere *vergroting van het productievolume met de aanwezige productiefaciliteiten* na te streven.

Aangezien de technische systemen (hier: de fabricagemiddelen) in een vaste lijn zijn opgesteld en een relatief onelastische produktiesnelheid bezitten (afhankelijk van fysieke grootheden met betrekking tot het bewerken van glas) kan alleen via een verhoging van het produktierendement een grotere hoeveelheid gereed produkt worden verkregen.

Het produktierendement wordt gedefinieerd als het percentage gerealiseerde produktievolume ten opzichte van de (theoretisch) haalbare produktie. Bij het bedrijf betekent dit voor de onderhoudsafdelingen, dat een verhoging van het produktievolume zou moeten worden bereikt door een:

- a* – verhoging van de lijngereedheid en/of
- b* – een vermindering van produktafkeur.

ad a.

Een *verhoging van de lijngereedheid* kan worden bereikt door het onderhoud zoveel als mogelijk tijdens geplande stops te laten uitvoeren (omstellen). Daarnaast moet het aantal onverwachte stops tijdens een produktierun tengevolge van storingen zo klein als mogelijk worden gehouden.

Het verhelpen van storingen op verantwoorde wijze vereist aandacht voor het systematisch opzetten van onderhoudsconcepten (OC)⁶, alvorens men de onderhoudsbeheersing kan analyseren en zonodig kan bijstellen. In de huidige opzet van het onderhoudsconcept bij het bedrijf domineert het storingsafhankelijk onderhoud (SAO) in het onderhoudsconcept voor de rotatiedelen aan de glasvormingsmachine.

ad b.

Het *verminderen van de produktafkeur* betekent dat men moet gaan analyseren welke oorzaken er aan de afkeur ten grondslag liggen. Door kwaliteitsspecialisten en procesdeskundigen zijn reeds velerlei afkeurredenen gedefinieerd. Onderzoek naar de oorzaken hiervan vereist diepgaand onderzoek naar de fysische processen van de glasfabricage.

In het kader van het onderzoek is besloten om na te gaan in hoeverre er verbeteringsmogelijkheden liggen op het gebied van het onderhoud aan de glasvormingsmachines.

In tweede instantie werd alleen het onderhoud i.v.m. storingen die resulteren in een (ong geplande) lijnstilstand als onderzoeks-onderwerp genomen. Aangezien het onderzoek naar de oorzaak van produktafkeur buiten de bedrijfskundige optiek ligt moet er door andere disciplines, zoals de toegepaste fysica, nader onderzoek worden gepleegd.

3. Analyse van de (onderzoeks-)probleemstelling

Zoals reeds eerder is gesteld, wordt bij een (vermeende) storing aan de glasvormingsmachine het rotatiedeel, dat vermoedelijk de storing veroorzaakte uitgebouwd en vervangen door een gereed rotatiedeel. Het komt niet zelden voor dat

na een nadere inspectie in de onderhoudswerkplaats blijkt dat er geen storing aan het desbetreffende rotatiedeel kon worden gevonden

Uit interviews met de machine-operators, onderhoudsmensen en de kwaliteitsdienst kunnen om een rotatiedeel te wisselen de volgende hoofdoorzaken bestaan:

- de toestand van het rotatiedeel
- een produktfout c.q. afwijking
- omstellen naar een andere produktfamilie
- 'klachten' vanuit de produktie
- naar aanleiding van inspectie
- bij wijze van experiment (overige redenen).

Het is echter zeer moeilijk gebleken om vooraf vast te stellen wat de precieze oorzaak is van een storing, waarop men kan nagaan of er

- terecht gewisseld is omdat er een storing aan het rotatiedeel is opgetreden, of
- er onterecht gewisseld is, omdat er storing in een ander TS (rotatiedeel) is opgetreden en er sprake is van een bedieningsfout of andere niet nader bekende oorzaken.

De redenen voor het ontbreken van een voldoende inzicht m.b.t. storingsprocessen zijn:

- de huidige storingsmelding c. q. registratie is onvolledig (er is ondermeer geen individuele identifiactie van de rotatiedelen aanwezig)
- de onderhoudshistorie van rotatiedelen is onbekend
- de onderhoudsvoorschriften vanuit de fabrikant zijn slechts indicatief
- de storingsgevolgen zijn niet altijd bekend.

Aangezien er niet structureel naar storingsinformatie is gezocht, gaat veel informatie verloren doordat deze alleen in mensenhoofden, en daardoor vaak subjectief, aanwezig is.

4. De onderzoeks aanpak

De aanpak om het probleem van incomplete storingsinformatie het hoofd te bieden, geldt achtereenvolgens:

- om de mogelijkheid van verkleining van de ongeplande lijnstilstand na te gaan is het nodig om inzicht te krijgen welke oorzaken dit heeft.
- in geval een storing als gevolg van degradatie van de produktiefunctie aan een rotatiedeel ten gevolge van het voorgeschreven gebruik van de glasvormingsmachine hieraan debet is, moet op het terrein van onderhoud naar een oplossing worden gezocht.
- om op het gebied van planning en besturing van het onderhoud beslissingen

te kunnen nemen of en wanneer er rotatiedelen moeten worden gewisseld, moeten eerst de onderhoudsactiviteiten zijn vastgesteld. Ook meer structurele beslissingen, zoals de inrichting van de onderhoudsorganisatie worden sterk beïnvloed door de aard en omvang van de onderhoudsactiviteiten.

- om de onderhoudsactiviteiten te kennen moet er voor elk relevant rotatiedeel een onderhoudsconcept (OC) zijn gemaakt.
- het systematisch opzetten van het vereist inzicht in onder meer de storingsconsequenties, het statistisch gedrag van storingen en kennis van eventueel storingsvoorspellende grootheden (SVG's).

Met betrekking tot het laatste punt heerst er grote onduidelijkheid over welke storingsprocessen een belangrijke rol spelen. Kennis en inzicht over het gedrag van de rotatiedelen van een glasvormingsmachine is niet expliciet vastgelegd. Het maken van schattingen over de storingsintervallen en de storingsoorzaken is derhalve mogelijk niet erg betrouwbaar.

Gezien het grote belang van de beslissingen die genomen moeten worden op grond van het inzicht in het storingsgedrag werd aldus besloten om een storingsregistratie-systeem op te zetten, opdat in eerste instantie:

- de aard van de (ver)storing kan worden bepaald
- eventueel een storingsdrager bekend wordt
- en het storingsgedrag van de geïdentificeerde storing kan worden bepaald
- en indien mogelijk, eerste aanzetten kunnen worden gegeven tot het zoeken naar SVG's.

5. De opzet van het storingsregistratiesysteem

Het introduceren van een nieuw registratiesysteem behoeft behalve een preciese specificering van de informatiebehoefte⁷ en een procedurele uitwerking, ook een organisatorische invulling.

Uiteindelijk moeten er mensen bereid worden gevonden die gemotiveerd zijn om de benodigde informatie te verzamelen en te interpreteren. Omdat er een additionele, deels administratieve effort in dit nieuwe registratiesysteem moet worden gestoken, staat de organisatie hier natuurlijk sceptisch tegenover.

De baten van een storingsregistratiesysteem en de kwaliteit van de daaruit voortvloeiende beslissingen zijn vooraf moeilijk in te schatten. Maar om toch een begin te kunnen maken is besloten om een reeks nieuwe rotatiedelen van een glasvormingsmachine individueel te gaan nummeren en een storingsregistratie te gaan opzetten voor die specifieke groep.

- *De informatiebehoefte*

Uit bovenstaande analyse van de onderzoeksprobleemstelling is af te leiden dat

de volgende gegevens in ieder geval door het storingsregistratiesysteem moet worden vastgelegd:

- a. als er een verstoring van de fabricage optreedt bij de glasvormingsmachine, wat is de hoofdoorzaak
- b. om welke storing in concreto gaat het
- c. welk rotatiedeel is verantwoordelijk voor de storing
- d. wat is de standtijd van het rotatiedeel, uitgedrukt in gebruikseenheden
- e. welke mogelijkheden zijn er om de storing te voorkomen.

ad a.

Het vaststellen van de hoofdoorzaak heeft betrekking op het bepalen om welke van de zes redenen een rotatiedeel werd gewisseld. Zodoende kan men vaststellen of men te maken heeft met een storing waarbij onderhoud de uitkomst biedt of dat een oplossing elders moet worden gezocht.

In ons geval zijn we alleen geïnteresseerd in die verstoringen die veroorzaakt zijn als gevolg het 'correcte' gebruik van een TS. De bepaling van de hoofdoorzaak behoeft aandacht van allen die met de glasvormingsmachine te maken hebben. De machine-operator weet hoe hij het TS heeft gebruikt, de kwaliteitsafdeling herkent diverse ongewenste produktafwijkingen en kan die eventueel in verband brengen met een oorzaak, de onderhoudsafdelingen inspecteren en eventueel repareren de rotatiedelen waaraan een storing werd vermoed.

Aangezien er sprake is van een samenhang tussen verstoring van het fabricageproces en de aard van de oorzaak, is een eenduidige vaststelling alleen mogelijk als in onderling overleg tussen alle afdelingen c. q. disciplines hierover gezamenlijk tot overeenstemming wordt gekomen.

Het bepalen van de oorzaak van een storing is tot nu toe noch procedureel noch organisatorisch geregeld.

ad b.

Voor elke type storing aan een rotatiedeel die verlies aan produktietijd of kwaliteitsverlies veroorzaakt moet het storingsgedrag worden vastgesteld. Essentieel hierbij is, behalve wanneer en wie een storing kan ontdekken, dat er ook duidelijkheid moet zijn over welke diagnose gepleegd moet worden om dat te kunnen vaststellen.

Het eenvoudigste zijn de zelfsignalerende c. q. evidente storingsen. De machine-operator ziet aan het verloop c. q. stagnatie van het fabricageproces dat er een storing is opgetreden en weet ook welk rotatiedeel de storingsdrager is. Ingewikkelder is het geval waar er sprake is van een verborgen storing. De onderhoudsdienst moet na uitwisseling in de werkplaats via een inspectie bepalen wat de storing is, indien daarvoor voldoende technologische kennis van de storingsprocessen aanwezig is. Lukt dat niet dan gaat het om een onbekende storing, of er is een andere hoofdoorzaak aan te wijzen. Dit moet dan door alle betrokkenen (kwaliteits-, productie- en onderhoudsafdeling) gezamenlijk worden onderzocht.

Ofschoon het voor de storingsanalyse niet van belang is waar een storing (oorzaak) wordt vastgesteld, aangezien men hoofdzakelijk in standtijden is geïnteresseerd, is het in de operationele beheersing wel degelijk van belang, om een storing en diens storingsdrager te kunnen bepalen op het moment als deze nog ingebouwd is. Men kan dan namelijk het kostbare onterecht wisselen vermijden.

ad c.

Zoals al onder punt b gesteld is, is de vaststelling van de storingsdrager van belang met daaraan gekoppeld welke storingen met de bijbehorende eenduidige verschijningsvorm.

Behalve voor de statistische analyse van het storingsgedrag is in het opzetten van het OC en voor structurele beslissingen in de onderhoudsbeheersing in een later stadium (b.v. het benodigde aantal rotatiedelen) van groot belang dat men weet over welke storingsdragers men spreekt.

ad d.

Voor het maken van schattingen voor de verwachte storingsintervallen moet men de standtijd van elk individueel rotatiedeel gaan registreren, d.w.z. het aantal eenheden gebruik dat verloopt tussen het moment van inbouw en in bedrijfname van dat bewuste rotatiedeel en het moment dat er een storing is opgetreden (het storingsinterval).

De schattingen van de verwachte storingsintervallen en de betrouwbaarheidskromme van de individuele rotatiedelen is van belang om later een oordeel te kunnen hebben over de potentiële effectiviteit van de GAO-onderhoudsregel (= Gebruiksduur Afhankelijk Onderhoud) en het schatten van onderhoudsintervallen⁶. Ten behoeve van bovenstaande doeleinden wordt gebruik gemaakt van zogenoemde Hazard plots waardoor men inzicht krijgt in de storingsgraad en in het (gemiddelde) storingsinterval⁵. Bij een registratie van de standtijden is het van belang om vooralsnog individuele rotatiedelen te onderscheiden ook al zijn die van hetzelfde type. Later bij beschikbaarheid van voldoende storingsgegevens moet blijken of een onderscheid naar alleen het type voldoende is.

Een tweede aandachtspunt bij de storingsregistratie is de vaststelling van de eenheid van gebruik. Initieel is aangenomen dat de tijd een geschikte maat is als gebruikseenheid.

ad e.

In beginsel kan men ernaar streven om d. m. v. het systematisch opstellen van het OC het aantal storingen te verminderen. Door het toepassen van het OC in de beheersing van de onderhoudsactiviteiten kan blijken in de evaluatiefase dat bepaalde storingen met zeer grote consequenties (lijnstilstand) blijven optreden. Aangezien aanpassing van het gebruik en aanpassing van de onderhoudsorganisatie beperkte mogelijkheden bieden binnen het bedrijf gaat de interesse vooral uit naar de aanpassing van het OC en eventuele modificaties.

Aanpassing van het OC zou inhouden dat men bijvoorbeeld minder voorkeur heeft voor GAO-regels en naar mogelijkheden zoekt voor TAO (= Toestands-Afhankelijk Onderhoud). Voorwaarde hiervoor is wel dat men een geschikte SVG kent.

Het op te zetten registratiesysteem moest ruimte bieden om hiermee te experimenteren.

Door de lange levensduur van een glasvormingsmachine (enkele tientallen van jaren) is een terotechnologische terugkoppeling op korte en middellange termijn van ondergeschikt belang.

Besloten werd om het registratiesysteem op te zetten, rekening houdende met de bovenstaande globale informatiebehoefte en kanttekeningen. Dit houdt ondermeer in dat er aandacht besteed moet worden aan het eigenlijke verzamelen van de benodigde gegevens zelf (fase I) en ontkoppeld hiervan, de interpretatie van die gegevens (fase II).

De ontkoppeling is zinvol omdat alleen bij de beschikbaarheid over voldoende storingsgegevens een statistische analyse mogelijk is die na verloop van tijd werden verzameld.

In fase II wil men, behalve mogelijkheden vaststellen die binnen het bereik van het onderhoud liggen ook de mogelijkheid hebben om (snel) te kunnen beslissen of modificatie niet toch beter is. Als mogelijk criterium dient dan de mate van zekerheid die men vooraf heeft, dat een modificatie ook daadwerkelijk effectief is en de kosten daarvan.

Met inachtneming van het bovenstaande kan men uitgaan van een behoefte aan tenminste de volgende gegevens van een rotatiedeel van de glasvormingsmachine:

- type rotatiedeel en nummer van elk rotatiedeel afzonderlijk (de storingsdrager)
- het storingstypen en de storingsconsequenties
- de gebruiksduur (de 'standtijd') per storing
- eventuele meetwaarde van een storingsvoorspellende grootte (SVG).

Aanvullende gegevens zoals de kosten van een modificatie moeten indien nodig per geval worden vastgesteld.

- *De rotatiedeel geleidekaart*

De benodigde informatie is in het bedrijf niet aanwezig en moet dus eerst worden verzameld (fase I). Dit betekent dat:

- a. er een (nieuwe) procedure moet worden ontwikkeld om de informatie op systematische wijze te gaan verzamelen

- b. er bij die procedure rekening moet worden gehouden dat de benodigde informatie door het aanwezige personeel wordt bijgehouden en later ook door hen kan worden geanalyseerd (fase II)
- c. er een geschikte informatiedrager voor het verzamelen en ordenen van de storingsinformatie wordt ontworpen.

ad a.

In de opzet van een procedure rond de storingsinformatie is onderscheid gemaakt in twee fasen. In de eerste fase moet de benodigde informatie worden verzameld per individueel rotatiedeel. In dit geval moet men bij het wisselen van rotatiedelen de gegevens voor zover reeds bekend invullen. Als niet alles bekend is moet in de onderhoudswerkplaats een nadere inspectie verder uitsluitel geven.

In de tweede fase moet indien er voldoende informatie beschikbaar is een storingsanalyse kunnen worden uitgevoerd. Aangezien de tweede fase nogal omvangrijk is wordt deze fase opgedeeld in twee stappen. In de eerste stap wordt in de vorm van een tweewekelijkse vergadering de storingsgegevens geëvalueerd. Dit houdt in dat erop wordt toegezien of alle storingen die in de afgelopen periode zich hebben voorgedaan ook werkelijk zijn geregistreerd met de bijbehorende aanvullende gegevens. Tevens moet hier ook de hoofdoorzaak en indien mogelijk de precieze storingsoorzaak worden vastgesteld. De nadruk in deze vergaderingsronde ligt bij het bewaken, dat men niet met incomplete data zitten blijft.

In de tweede stap gaat men nader in op de feitelijke storingsanalyse. Dit betekent dat periodiek (eens in de drie maanden) een zogenoemde periodieke signaleringsvergadering wordt gehouden, waarvan de bedoeling is om na te gaan of er met betrekking tot storingen voldoende gegevens zijn om een storingsinterval te kunnen bepalen (via hazard plotting) of om bepaalde probleemgevallen te kunnen signaleren. Problemen kunnen ontstaan omdat bijvoorbeeld de eigenlijke oorzaak van sommige storingen nog niet is vast te stellen. In sommige gevallen zal men dan besluiten om te gaan 'experimenteren'. Ook kan men in deze periodieke ronde bijvoorbeeld een selectielijst samenstellen, waarin de rotatiedelen zijn geordend naar ernst van de storingen. Behalve dat men aandacht schenkt aan de 'toppers' kan men zodoende ook trends tijdig signaleren. In deze signaleringsronde worden dan ook de besluiten genomen aan welke rotatiedelen men aandacht wil besteden en welke verdere acties men wil nemen.

Daarnaast kan men besluiten dat het eigenlijk interessanter is om te zoeken naar een mogelijkheid om toestandsafhankelijk onderhoud (TAO) toe te passen, omdat gebruiksduurafhankelijk onderhoud (GAO) gebaseerd op het statistisch gedragsmodel de betreffende storingen niet kan uitsluiten. Verder vindt men bij het betreffende bedrijf dat indien een storing eenvoudig en niet tegen al te hoge kosten via een modificatie is op te heffen men dit ook meteen moet doen. Tenslotte kan men in de tweede fase besluiten dat als de belangrijkste storingen van een rotatiedeel voldoende bekend zijn en dat het nu mogelijk is om daarvoor het OC op te zetten hierover geen storingsgegevens meer bij te houden. Alleen

bij modificaties zal men eventueel overwegen om weer met het registreren van storings gegevens te beginnen.

ad b.

Ten behoeve van het vastleggen van gegevens in fase I ligt het voor de hand om dat personeel in te schakelen dat de storingen zelf kan waarnemen en identificeren. Zodoende kan vermeden worden dat er bij de overdracht informatie verloren gaat of wordt vertekend.

Het eerste deel van de tweede fase krijgt vorm in een zogenoemd tweewekelijkse evaluatievergadering zoals onder punt a. is besproken. Aan deze vergadering nemen deel; de 'hot end' produktiemanager, de produktie technologiespecialist(en), de 'hot end' (machine)onderhoudsmanager en zijn assistent en om assistentie te verlenen bij de start van deze vergadering ook de onderzoeker.

Aangezien men aan het tweede deel van de tweede fase bij beëindiging van het onderzoek er nog niet aan toe was, zijn hierover nog geen besluiten genomen over de organisatorische inrichting daarvan.

ad c.

Aangezien een belangrijk deel van de te verzamelen informatie rotatiedeel gebonden is ligt het voor de hand een koppeling te zoeken tussen elk individueel te beschouwen rotatiedeel en de informatiedrager. Wellicht kan de informatie het beste worden vastgelegd op de plek waar ze ontstaat.

In dit onderzoek is gekozen voor een tweezijdig bedrukte kaart die geïdentificeerd wordt door hetzelfde nummer als het rotatiedeel waarop de kaart betrekking heeft. Deze zogenoemde rotatiedeel geleidekaart (RGK) wordt ingevuld als een rotatiedeel wordt ingebouwd en later gecompleteerd bij de uitwisseling en inspectie daarvan in b.v. de onderhoudswerkplaats. Van groot belang is dat de machineoperator danwel de onderhoudsmonteur zorgvuldig is ten aanzien van het zo compleet en precies als mogelijk invullen van de RGK's. De RGK's worden als ze volledig zijn ingevuld verzameld en geordend naar rotatiedeelnummer opgeborgen.

Ten tijde van het onderzoek was er sprake van een experimentele situatie zodat er geen aandacht is besteed aan eventuele automatiseringsmogelijkheden. Van veel groter belang vond men dat men na afloop van het onderzoek een goed werkende procedure had, wat op zich volledige aandacht vergde.

6. Eerste resultaten van de storingsanalyse

Ten tijde van het onderzoek is bovenstaande procedure in samenwerking met het personeel opgezet. Ofschoon alle betrokkenen actief bij de opzet van deze procedures vertegenwoordigd waren blijft er toch wat scepsis bestaan over de toepasbaarheid. Om aan te tonen dat er bruikbare resultaten kunnen worden behaald

is ook daadwerkelijk het RGK-systeem en de tweewekelijkse evaluatievergadering opgestart.

Een aantal nieuwe rotatiedelen van de glasvormingsmachine werden daartoe genummerd (voor de identificatie) en de storingsvormen werden op de RGK-formulieren ingevuld. De onderzoeker heeft daarbij de onderhouds- en produktiemensen intensief ondersteund bij het uitvoeren van dit tot nog toe onbekende stuk administratie. Deze ondersteuning was nodig omdat men niet gewend was om een stukje administratie te gaan doen ('dat is extra werk'), bovendien kunnen nog nuttige suggesties met betrekking tot het ontwerp van het RGK-formulier worden opgenomen ten behoeve van eventuele bijstellingen in het ontwerp daarvan.

Na verloop van tijd is men ook aan fase II begonnen.

In het begin werd ook deze nieuwe vergadering door de onderzoeker bijgewoond om ook hier de mensen te motiveren door te wijzen op het belang van het vaststellen van de juiste hoofdoorzaken.

Aan het einde van de onderzoeksperiode waren er nog onvoldoende gegevens om ook de drie maandelijks signaleringsronde in de praktijk om te zetten. Wel is bij wijze van demonstratie voor het pegelmechanisme een zogenoemde storingsanalyse met de hulp van de methode van Nelson ('Hazard plotting') toegepast. Aangezien de methode inhoudelijk in Geurts^(3, 4, 5) is uitgelegd wordt hier volstaan met het beknopt weergeven van de resultaten.

In de tabellen 1 en 2 zijn de storingsintervallen opgenomen voor de zuigerstangen van het pegelmechanisme met betrekking tot de storing 'afbreken van de kop' of een andere storing aan de zuigerstang die dan als gecensureerde waarneming vermeld wordt.

Van de 24 onderzochte zuigerstangen zijn, ten tijde van analyse (26/10/89), 6 exemplaren onafgebroken in werking geweest zonder dat de kop van de zuigerstang is afgebroken.

Als levensduur van deze exemplaren geldt een ondergrens van 112 dagen. Daarnaast zijn er nog enkele pegelcilinders, die vanwege storingen aan andere onderdelen zijn uitgewisseld. In deze gevallen werd niets veranderd aan de zuigerstangen. Ook deze waarnemingen worden als gecensureerd beschouwd, waarbij de ondergrenzen volgen uit het registratiesysteem. Van de levensduren van de 24 zuigerstangen zijn er tot nu toe 8 beëindigd door de onderzochte storingsoorzaak.

Bij de toepassing van de statistische analyse zijn er twee aannames gedaan:

- in de figuren wordt geen onderscheid gemaakt in welk pegelmechanisme de zuigerstangen waren ingebouwd (ook niet naar machinesectie)

Het onderhoud aan de zuigerstangen levert een 'as good as new' conditie op voor dat onderdeel. Met andere woorden men kan technisch effectief onder-

A	B	C	D
1	1	79	ja
2	2	105 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
3	3	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
4	4	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
5	5	25	ja
6	6	96	ja
7	7	80	ja
8	8	110	ja
9	9	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
10	10	109 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
11	11	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
12	12	70	ja
13	13	13 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
14	14	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
15	15	112 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
16	16	70	ja
17	17	69	ja
18	18	111 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
19	19	52 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
20	20	99 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
21	61	101 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
22	62	101 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
23	63	95 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
24	64	34 (n.n.b.)	nee, gecensureerd
<i>Betekenis van de kolomhoofden:</i>			
A:	waarnemingsnummer		
B:	rotatiedeelnummer waar de zuigerstang in zit		
C:	levensduur zuigerstang (beëindigd of ondergrens)		
D:	beëindigd door beschouwde storingsoorzaak?		

(n.n.b.) = niet nader bekend

Tabel 1. Gegevens afgeleid uit de RGK's van het pegelmechanisme.

I	II	III	IV	V	* VI
1	24	13	0 / (13- 0)	0	0,0
2	23	25	(1/23) / (25- 13)	1/23	0,043
3	22	34	0 / (34- 25)	0	0,043
4	21	52	0 / (52- 34)	0	0,043
5	20	69	(1/20) / (69- 52)	1/20	0,094
6	19	70	(1 19) / (70- 69)	1/19	0,146
7	18	70	(1/18) / (70- 70)	1/18	0,202
8	17	79	(1/17) / (79- 70)	1/17	0,261
9	16	80	(1/16) / (80- 79)	1/16	0,323
10	15	95	0 / (95- 80)	1/15	0,323
11	14	96	(1/14) / (96- 95)	1/14	0,390
12	13	99	0 / (99- 96)	0	0,390
13	12	101	0 / (101- 99)	0	0,390
14	11	101	0 / (101-101)	0	0,390
15	10	105	0 / (105 101)	0	0,390
16	9	109	0 / (109-105)	0	0,390
17	8	110	(1/ 8) / (110 109)	1/ 8	0,515
18	7	111	0 / (111- 110)	0	0,515
19	6	112	0 / (112- 111)	0	0,515
20	5	112	0 / (112- 112)	0	0,515
21	4	112	0 / (112 112)	0	0,515
22	3	112	0 / (112- 112)	0	0,515
23	2	112	0 / (112- 112)	0	0,515
24	1	112	0 / (112-112)	0	0,515

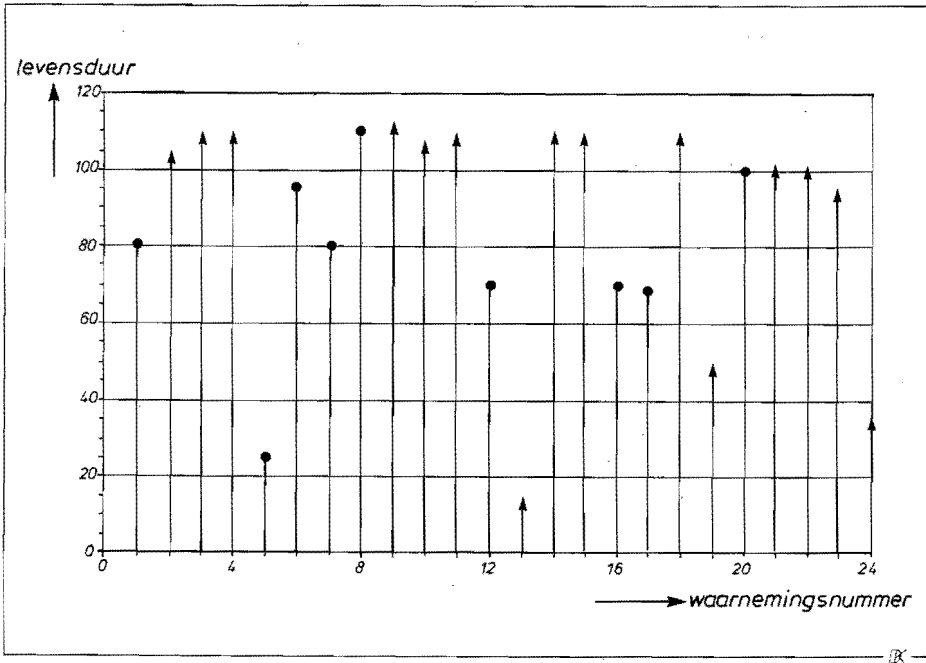
Betekenis van de kolomhoofden :

I	rangnummer (i)
II	aantal survivors : n - i + 1
III	storingsinterval in dagen (oplopend)
IV	geschatte storingsgraad: $\approx z(g)$
V	geschat oppervlak $\approx z(g) \Delta g$
VI	cumulatief oppervlak: $H(g) = \sum z(g) \Delta g$

Tabel 2. Data benodigd voor de hazard plot m.b.t. de storing 'afbreken van de kop' van het pegelmechanisme.

houd plegen. Om dit na te gaan heeft men de afzonderlijke storingen in chronologische volgorde geplaatst (zie figuur 4). Vooral nog geeft de figuur geen aanleiding om deze aanname te herzien.

- als maat voor de gebruikseenheid is de tijd uitgedrukt in aantallen van dagen genomen, omdat dit eenvoudig is te hanteren. Blijkt achteraf dat de tijd geen geschikte parameter is moet men zoeken naar een andere gebruikseenheid.



Figuur 4. De storingsintervallen in een chronologische volgorde.

De bovenstaande aannames zijn gedaan om over voldoende statistisch materiaal te kunnen beschikken. Mocht later blijken dat dit tot niet korrekte conclusies leidt, dan kan men altijd nog storingsanalyses uitvoeren bijvoorbeeld per individueel pegel-mechanisme om te zien of dit significante verschillende storingsintervallen oplevert.

In figuur 5 is de hazardplot van de gegevens uit de tabellen weergegeven.

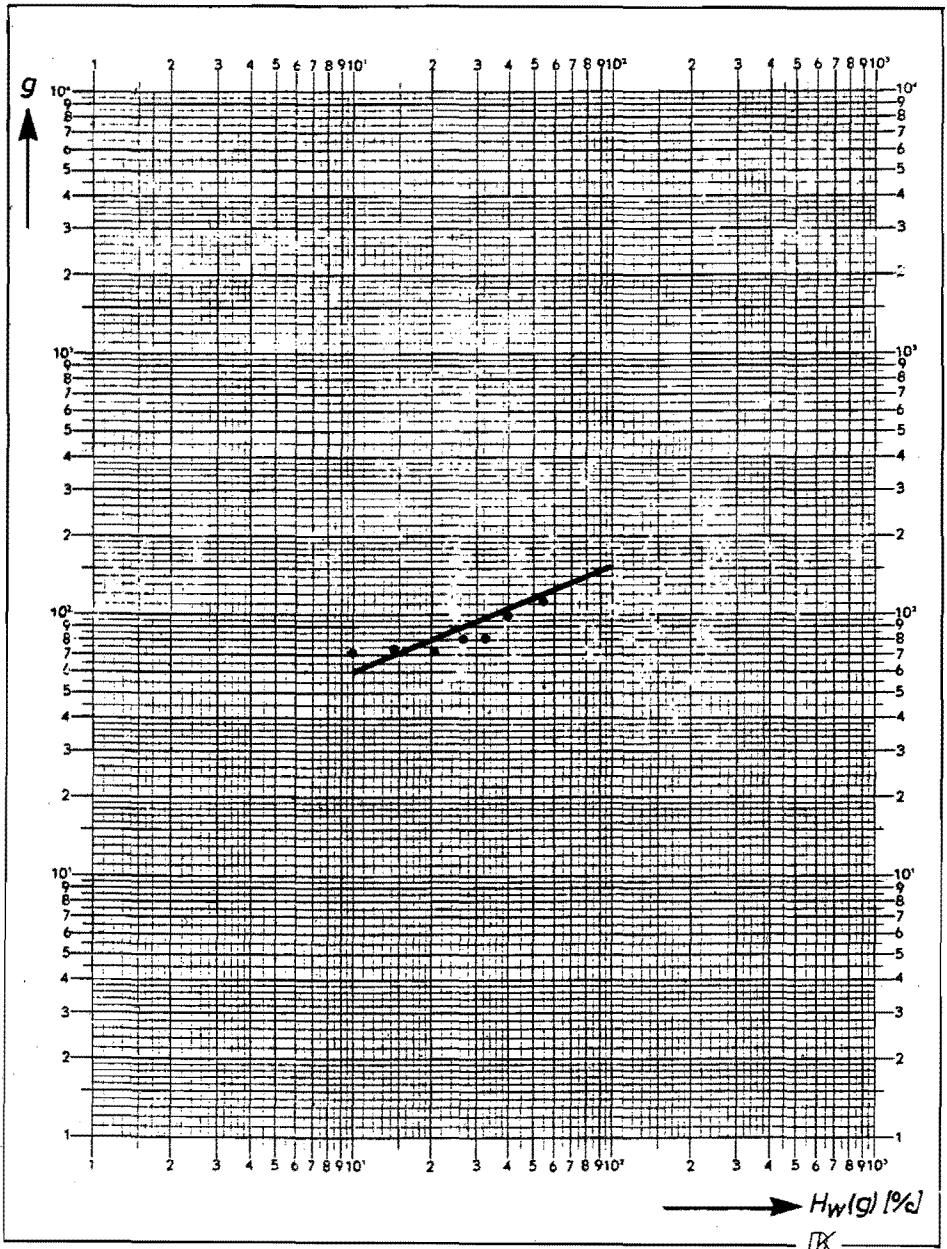
Uit de plot is af te leiden dat er sprake is van een stijgende storingsgraad (GAO is dus potentieel effectief) met een vormparameter (beta-waarde) van 2 en een schaal-parameter (alphawaarde) van 150 dagen.

De alpha- en beta-waarden kunnen met behulp van tabel 1 uit Geurts⁴ worden gebruikt om het gemiddelde en de standaardafwijking van het storingsinterval te schatten.

$$\text{gemiddeld storingsinterval} = 150 \times 0,89 = 133 \text{ dagen}$$

$$\text{standaardafwijking storingsinterval} = 150 \times 0,46 = 69 \text{ dagen}$$

Volgens Geurts⁵ kan vervolgens een overlevingskarakteristiek ($R(g)$) worden geschat. Hieruit krijgt men goede indruk (we spreken nog steeds over op schattingen gebaseerde afgeleiden) over het 'risico' dat de storing 'afbreken van de kop' optreedt als functie van het gebruik (in ons geval in dagen). Men kan uit die overlevingskarakteristiek afleiden dat na bijvoorbeeld 100 dagen door het ver-



Figuur 5.

vangen van de zuigerkop naar verwachting 65% van deze storingen kan worden voorkomen.

De eerste reactie van de productie - en onderhoudsmensen was dat men verbaasd was over de regelmaat waarin de storing optrad. Men vond de consequenties van

de storing ernstig genoeg om in eerste instantie via modificatie (inbouwen van een ring in het pegelmechanisme) het verwachte storingsinterval te verlengen. Na toepassing van deze modificatie zijn de fysieke eigenschappen van het pegelmechanisme veranderd en moet men opnieuw storingen volgens boven geschetste opzet registreren om daaruit weer schattingen over het storingsgedrag te kunnen maken. Zodoende kan men nagaan of de modificatie inderdaad het storingsinterval heeft verlengd of de storing opgeheven.

Bovendien kan men, indien men in OC het GAO alternatief overweegt, dan een geschikt reparatie- of vervangingsinterval kiezen.

7. Conclusie

De proef met de RGK-kaart heeft duidelijk gemaakt dat er op deze wijze bruikbare gegevens voor een storingsanalyse kunnen worden verzameld.

Tevens is gebleken tijdens 'proef'-vergaderingen dat het zeer zinvol is om met de betrokken disciplines (productie, onderhoud en kwaliteitszorg) samen over de storingen en hun oorzaken te praten. Hieruit vloeien nieuwe taakstellingen met betrekking tot nader onderzoek voort, of er wordt materiaal aangeleverd voor de storingsanalyse voor de driemaandelijkse signaleringsronde.

Opmerkelijk is dat door de wijze van betrokkenheid van de diverse vakdisciplines onderliggende tegenstellingen sterk zijn verminderd, aangezien bij allen een gemeenschappelijk doel duidelijk voor ogen staat en beslissingen zijn gebaseerd op geobjectiverde waarnemingen. Immers alle betrokkenen hebben in belangrijke mate baat bij een betrouwbare storingsanalyse.

Het spreekt voor zich dat de kwaliteit van de conclusies die uit zo'n storingsregistratie voortvloeien afhangen van de beschikbaarheid en kwaliteit van de benodigde gegevens die op de RGK-kaarten worden bijgehouden. Dit betekent dat de onderhouds monteurs, de voorlieden en de produktiemensen zeer gemotiveerd moeten zijn om bij het invullen zorgvuldig te zijn. Bij het betreffende bedrijf wordt de motivatie hoofdzakelijk geput uit een grote betrokkenheid in de besluitvorming die volgt op de registratie. Voor de hogere niveau's van besluitvorming c.q. de leden van de fase II vergaderingen is hierdoor meer inzicht beschikbaar op de storingsprocessen dan alleen de RGK-kaart informatie.

Gezien het succes van de proef is men nu aan het overwegen om de RGK-kaart definitief in te voeren voor andere rotatiedelen. De PLM-leiding is er van overtuigd dat het ontwikkelde storingsregistratiesysteem een belangrijke stap is in het opzetten van een OC, waarbij als neveneffect ook een beter inzicht ontstaat in mogelijke oorzaken van produktafkeur, wat in dit onderzoek verder niet aan de orde is geweest.

Literatuur

1. Delahay, G.H.V.M., *Ontwerp en implementatie van een storingsregistratiesysteem bij PLM Glasindustrie Dongen BV*. Afstudeerverslag, Technische Universiteit Eindhoven, 1989.
2. Geraerds, W.M.J., *Het TUEonderhoudsmodel*. In Lamberti c. s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij 1987, hoofdstuk B3010.
3. Geurts, J.H.J., *Beginselen uit de betrouwbaarheidstheorie*, In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987, hoofdstuk D4010.
4. Geurts, J.H.J., *Betrouwbaarheidsmodellen*, In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij 1987, hoofdstuk D4011.
5. Geurts, J.H.J., *Grafische methoden*, In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987 hoofdstuk D5010.
6. Gits, C.W. *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept: een kader*. In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987, hoofdstuk D3010.
7. Martin, H.H., *Evaluatiemethoden van standaard software*, In Lamberti c.s. (eds) *Onderhoudsmanagement; handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987, hoofdstuk G8020.

Aanzet tot informatieanalyse van het onderhoudsconcept

28

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. F.J.W. Claus en samengevat en bewerkt door ing. E.J.L. Lamberti

1. Aanleiding van het onderzoek

Begin jaren tachtig is door een extern adviesbureau de gehele onderhoudsorganisatie binnen DSM doorgelicht, in samenwerking met de interne afdeling voor organisatie en efficiency. Een gedetailleerde beschrijving van dit Project Doelmatig Onderhoud (PDO) is door Tan⁸ gemaakt.

Uitgaande van de resultaten van PDO is in 1987 een vooronderzoek gestart waarin de functies van een standaard softwarepakket voor de onderhoudsbeheersing zijn vastgelegd. Dit heeft in 1989 geleid tot de aanschaf van Teroman. De implementatie van dit pakket, binnen de divisie Kunststoffen, zal tot eind 1990 duren.

Daarnaast is men in het bedrijf op de hoogte van het ontwerp kader voor het onderhoudsconcept, binnen de Technische Universiteit Eindhoven ontwikkeld door Gits³. Men wil deze methode gaan toepassen.

Enerzijds bestaat er binnen het bedrijf het vermoeden dat er verschillen zijn tussen het ontwerp kader en de huidige methode die het bedrijf hanteert bij het ontwerpen van onderhoudsconcepten (*DSM-methode*). Deze verschillen wil men graag in kaart gebracht zien. Anderzijds wordt verondersteld dat Teroman niet volledig beantwoordt aan de functionele eisen zoals deze uit het ontwerp kader resulteren. Binnen DSM is men daarom tevens geïnteresseerd in de vraag in hoeverre Teroman beantwoordt aan het ontwerp kader.

2. Opdrachtformulering en onderzoeksmethode

– *Opdrachtformulering*

Om aan de bovenstaande globale probleemstelling inhoud te kunnen geven moeten de beschrijvingen van het ontwerp kader en Teroman in dezelfde ‘taal’ plaatsvinden. In dit geval legt Teroman beperkingen op aan deze ‘taal’. Een softwarepakket kan namelijk het makkelijkst worden beschreven door in te gaan op de functies die het uitvoert. Daarom luidt de opdrachtformulering als volgt:

‘Ervan uitgaande dat men de theorie van het onderhoudsconcept wil toepassen, voer een voorstudie uit waarin wordt aangegeven hoe, in welke vorm en welke functionele specificaties van een informatiesysteem dat het onderhoudsconcept ondersteunt, moeten worden vastgelegd.

Bepaal vervolgens hiermee, in hoeverre Teroman en ontwerp kader overeenstemmen’.

Onder functionele specificaties wordt verstaan:

De beschrijving van de functies/processen (die een informatiesysteem moet kunnen uitvoeren) in termen van input, verwerking en output¹.

– *Operationalisatie van de opdracht*

Omdat bovenstaande opdrachtformulering abstract van karakter is, moet aangegeven worden wat precies de uitkomst van de opdracht zijn moet.

Hiertoe is zij gesplitst in zes stappen:

1 ontwikkel een procesmodel van het ontwerp kader voor het onderhoudsconcept. Dit model zal op een hoog abstractieniveau worden ontwikkeld. Hoewel de nadruk ligt op specificaties van functies en processen zal in deze stap ook een conceptueel datamodel worden ontworpen.

In de toelichting op het stappenplan zal dit worden uitgelegd

2 gebruik het procesmodel uit de vorige stap, als referentiemodel voor het opstellen van het procesmodel van de huidige methode die DSM gebruikt bij het genereren van onderhoudsconcepten.

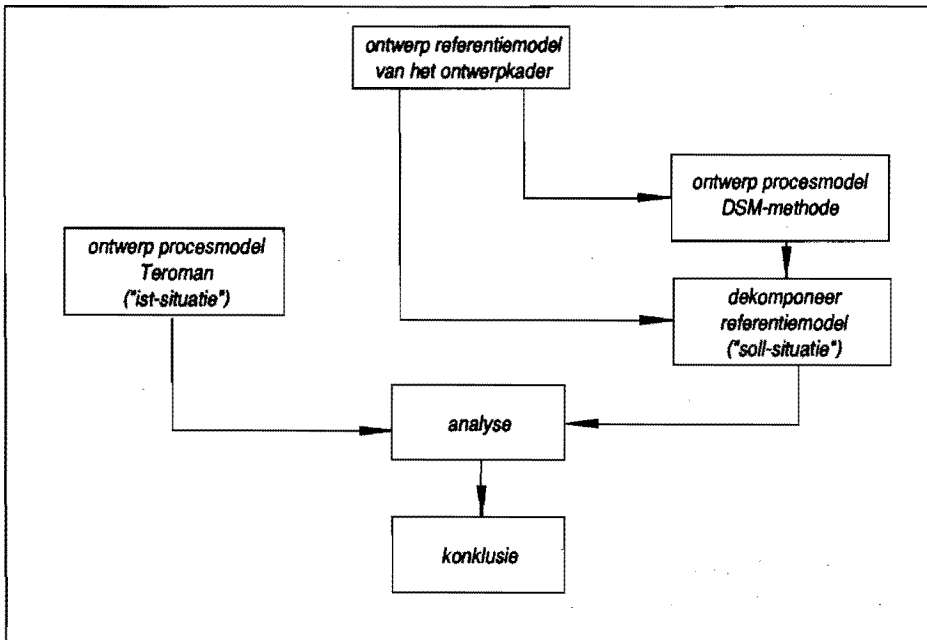
Dit model zal op een laag aggregatieniveau worden ontwikkeld

3 decomposeer, met behulp van het gedetailleerde procesmodel uit stap 2, het referentiemodel uit stap 1. Dit wil zeggen dat het gedetailleerde model uit stap 2 ingepast zal worden binnen het ontwerp kader.

Als inpassing niet mogelijk is of als het model onvolledig is, zal dit worden aangegeven en zullen alternatieven worden aangedragen

- 4 ontwikkel een procesmodel van Teroman
- 5 onderzoek in hoeverre Teroman tegemoet komt aan de eisen zoals uit het model van stap 3 volgt
- 6 formuleer op grond hiervan conclusies.

Bovenstaande stappen zijn grafisch weergegeven in figuur 1.



Figuur 1. Het verband tussen de stappen uit de opdracht

In dit verband wordt onder een *procesmodel* het geheel van bedrijfsactiviteiten verstaan met hun relaties en specifieke inputs en outputs binnen een business area. Een *datamodel* geeft de relaties weer tussen entiteits-typen binnen een business area. Met *entiteitstypen* worden concrete of abstracte begrippen bedoeld, waarvoor het zinvol is om er meerdere keren gegevens over te bewaren en die bovendien worden beschreven door minstens 1 niet-identificerend attribuut.

– *Toelichting bij het stappenplan*

– Uit de stappen 1, 2 en 3 blijkt dat de nadruk ligt op het ontwikkelen van procesmodellen. Uiteraard houdt dit direct verband met het feit dat deze modellen de functies weergeven die het informatiesysteem moet bevatten.

Aan datamodellen wordt veel minder aandacht geschonken. Dit heeft de volgende redenen:

- Zowel theorie als praktijk zijn proces-georiënteerd. Beide gaan uit van stappen en activiteiten die uitgevoerd moeten worden bij de ontwikkeling van een onderhoudsconcept. Entiteitstypen en attributen zijn daarentegen onbekende begrippen.
- Het is met behulp van een procesmodel veel gemakkelijker om de entiteitstypen en attributen van het datamodel te benoemen. Andersom is de steun van een datamodel bij de ontwikkeling van een procesmodel naar mijn mening geringer. Hiermee wordt tevens een nadeel van IEM (Information Engineering Methodology) blootgelegd. Binnen IEM moet het data-model bekend zijn wil men het procesmodel volledig kunnen definiëren en invoeren. De in- en output van processen zijn namelijk attributen van entiteitstypen van het bijbehorende datamodel.
- Het betreft hier een voorstudie waarbij het exact definiëren van de benodigde entiteiten en attributen nog niet relevant is. Eerst moet overeenstemming worden bereikt over wat het systeem in termen van functies moet bevatten

Toch wordt er binnen stap 1 een conceptueel datamodel ontworpen. De reden hiervan is dat het relatief weinig moeite kost om uit het ontwerp kader de entiteitstypen en de relaties daartussen af te leiden. Het datamodel kan bij de definiëring van de gebruikte termen binnen het procesmodel haast 'en passant' worden meegenomen.

Bij de ontwikkeling van het procesmodel van de huidige methode die DSM nu hanteert is dit *niet* het geval. Hier wordt een conceptueel datamodel dan ook achterwege gelaten.

– In stap 2 is de term referentiemodel gebruikt. Dit geeft aan dat uit de theorie van het onderhoudsconcept een procesmodel afgeleid zal worden dat algemene geldigheid bezit.

Het onderzoeksgebied zal zich beperken tot de Onderhouds Diensten Groep (ODG) binnen de divisie Kunststoffen. Dit betekent automatisch dat de systeemgrens van de procesmodellen uit de stappen 2, 3 en 4 ook bij de ODG liggen. De methodiek die gebruikt is om de informatie-analyse uit te voeren is Information Engineering Methodology (IEM). Deze methodiek is geschikt om een informatiesysteem volledig te ontwerpen en in te voeren. De afstudeeropdracht heeft echter betrekking op het ontwerpen van functionele specificaties. Dit betekent dat de opdracht zich afspeelt op een klein gebied binnen IEM.

Er zijn vier redenen voor de keuze van deze methode:

- De belangrijkste reden is dat zij de standaardmethode is voor informatieanalyse binnen het bedrijf
- Volgens Essink en Romkema¹ bevindt IEM zich vrijwel in het midden van het continuüm van volledig procesgeoriënteerd naar volledig gegevensgeoriënteerd. Dit betekent dat deze methode er in geslaagd is om zowel de actieve als de passieve kant van een informatiesysteem goed met elkaar in verband te brengen.
- Binnen IEM is een tool ontwikkeld, het softwarepakket Information Engineering Facility, dat een hulpmiddel kan zijn bij het toepassen van IEM.
- IEM is al vele malen in de praktijk toegepast, mede door een afstudeerder van de TU Eindhoven.

Omdat bij het ontwikkelen van een informatiesysteem altijd een analyse van de bestaande situatie hoort, kan juist binnen deze fase veel tijd worden bespaard door gebruik te maken van referentiemodellen:

- als geen beschrijving van de bestaande situatie voorhanden is kan zij relatief snel gemaakt worden door ieder onderdeel van het referentiemodel aan te vullen met bedrijfsspecifieke gegevens. Van onderdelen die niet of slechts gedeeltelijk ingevuld kunnen worden, weet men dat zij aanvulling behoeven.
- als wel een situatiebeschrijving aanwezig is kan snel met behulp van een referentiemodel gekeken worden welke gegevens en functies men mist.

Voor verdere literatuur over referentiemodellen wordt verwezen naar⁴.

3. Vergelijking huidige methode met het gedecomposeerde ontwerpkader voor het onderhoudsconcept

De vergelijking van de twee methoden om onderhoudsconcepten te genereren vindt plaats op basis van een variant van het checklistprincipe zoals dit wordt geïllustreerd door Martin⁷. Dit is weergegeven in tabel 1.

Hierbij worden op de horizontale as de processen van de DSMmethode vermeld terwijl op de verticale as de processen van het aangepaste ontwerpkader voor het onderhoudsconcept worden opgesomd. (Aangepast wil zeggen dat de resultatenanalyse wordt meegenomen). Via een ja/nee-markering wordt aangegeven of een proces overeenkomt binnen beide methoden.

Martin stelt bij deze methode terecht dat met de checklistmethode enkel een globale verkenning kan worden uitgevoerd.

Daarom is enerzijds de ja/nee-markering vervangen door een andere:

Toelichting bij de cijfers uit tabel 1:

ad 1.

Als eerste moet worden opgemerkt dat men het bepalen van de urgentie van een systeem toch heeft ingepast binnen de technische systeem analyse. Strikt genomen hoort dit proces niet thuis in het ontwerpkader. Dit gaat ervan uit dat besloten is om voor een bepaald object een onderhoudsconcept (OC) te maken. Het keuzeprobleem voor welk object wel en voor welk object geen OC wordt gemaakt is hierbij niet interessant.

Toch wordt dit proces wel opgenomen in 'dit' model omdat het de eerste beslissing is die genomen moet worden op weg naar een OC.

Bij de bouw van een fabriek moet vanaf het begin af aan duidelijk zijn waarom een bepaald object belangrijk is. De methode van het bepalen van de storingsconsequenties moet van grof (objectniveau) naar fijn (componentniveau) zijn. Zoals al is gezegd wordt in het ontwerpkader de afweging op objectniveau niet uitgevoerd.

In een procedure is vastgelegd hoe de afweging per object moet plaatsvinden. Uitgaande van de criteria produktieverlies en veiligheid wordt op basis van *normen* bepaald of een object kritiek is voor een proces.

Als dit het geval is moet worden overwogen of geen reserveobject moet worden aangeschaft. Hierbij speelt vooral de verhouding prijs/consequenties een rol.

Als een object niet kritiek is moet bekeken worden of het een onderhoudszwaartepunt is. Ervaringen uit het verleden met soortgelijke objecten vormen de input bij deze beslissing.

De uitkomst van de beslissingen is een classificatie van de objecten:

Klasse 1: Objecten waarvoor de stappen uit het gedecomposeerde ontwerpkader volledig worden doorlopen.

Grofweg zal dit voor 20% van de objecten gelden.

Klasse 2: Objecten waarvoor een standaardonderhoudsconcept geldt dat nauwelijks aangepast hoeft te worden.

Klasse 3: Objecten waaraan correctief onderhoud wordt gepleegd.

Op de normen voor de storingsconsequenties na, hoeft de beschreven procedure niet verder te worden geformaliseerd of geautomatiseerd. De classificatie moet via overleg tussen de ODG, Productie en Engineering tot stand komen.

Het functioneel decomponeren van het systeem wordt alleen impliciet gedaan. Dit hangt nauw samen met het feit dat het toekennen van basisstorings zoals deze in het ontwerpkader wordt aanbevolen, in de praktijk nergens expliciet op

papier staat. Intuïtief neemt iedere Maintenance Engineer (ME) de mogelijk optredende storingen per component wel mee, maar dit komt in de huidige methodiek niet tot uitdrukking. Er wordt voor zover mogelijk naar onderhoudskosten per component gekeken. Welke storingen precies deze kosten veroorzaken wordt niet systematisch genoteerd. Het enige proces binnen DSM dat enigzinds vergelijkbaar is met het toekennen van storingen aan componenten is de storingsanalyse. Hiermee wordt inzicht verkregen in de consequenties van sommige storingen. Voor het onderhoud is deze analyse niet voldoende omdat niet alle voor het onderhoud relevante storingen boven tafel worden gehaald. Het gevolg van bovenstaande is dat het OC uit de DSM-methode nauwelijks een basis heeft waarop het is gegrondvest (of deze is alleen bekend bij de engineer die het heeft opgesteld).

Ten tweede kan niet goed teruggekoppeld worden als niet vastligt of een bepaalde consequentie ernstig is of niet.

Ten derde is de kwaliteit van een OC, als storingen niet expliciet ten grondslag liggen aan de onderhoudsregels, sterk afhankelijk van de ervaring van de engineer.

Eigenlijk zou iedere storing op een basisstoringsformulier moeten worden aangekend. Dit formulier is ontwikkeld en vervolgens ingevuld voor basisstoringen van een centrifuge uit een nieuw te bouwen fabriek binnen DSM.

Het proces 'Bestel reservedelen' behoort tot de voorraadbeheersing en is daarom weggelaten uit de decompositie.

ad 2.

De essentie van het initiëren van het onderhoud, de toekenning van een elementaire onderhoudsregel (EOR), is binnen DSM niet bekend. Het gevolg hiervan is dat binnen DSM soms driemaandelijks aan een component een toestandsmeting wordt uitgevoerd (TAO-regel) terwijl vier-jaarlijks wordt vervangen (GAO-regel)

Het toekennen van een EOR gebeurt op basis van de ingevulde basisstoringsformulieren. De benodigde procedure hierbij nodig is ontwikkeld door Gits³. In deze procedure ligt de beslissing voor een EOR niet volledig vast, met andere woorden: de ME moet actief meedenken bij de keuze.

Binnen DSM is deze procedure als volgt geoperationaliseerd:

Tabel 2. Schema ter bepaling van het normatieve storingsgewicht

Storingsconsequenties	Weefactor			
	0	1	2	4
Produktiederving	nee	-	-	ja
Veiligheids-/milieu-consequenties	nee	-	-	ja
Materiaalkosten	op voorraad	niet op voorraad	-	-
Loonkosten	niet specialistisch	specialistisch	-	-
Gevolgschade	nee	-	ja	-

(Bron:⁵)

Bij de materiaalkosten wordt onderscheid gemaakt tussen onderdelen die wel op voorraad liggen en onderdelen die niet als voorraaditem worden gekenmerkt. Bij de loonkosten moeten specialistische activiteiten, hetgeen vaak inhuren van een firma buiten DSM betekent, anders gewaardeerd worden dan niet-specialistische activiteiten.

Door iedere basisstoring te beoordelen op haar gevolgen en de gewichten op te tellen ontstaat een normatief storingsgewicht. De consequenties worden klein geacht als dit normatieve gewicht kleiner is dan 2.

Bovenstaande tabel is subjectief. Iedere fabriek moet aan de consequenties een eigen weefactor geven.

In de toekomst moet differentiatie worden aangebracht in de weefactoren. Er moet onderscheid worden gemaakt tussen storingen die geen, weinig of veel gevolgen hebben. Dit betekent dat per fabriek normen in kosten moeten worden opgesteld. (Met uitzondering van de veiligheidseisen zijn kosten de gemeenschappelijke noemer binnen de storingsconsequenties). Deze normen zullen steeds moeten worden aangepast, afhankelijk van inflatie, uitgevoerde werkorde en dergelijke.

ad 3.

Het vaststellen van de onderhoudsactiviteit per component in de DSM-methode heeft hetzelfde doel als het operationaliseren van het onderhoud in het ontwerp-kader: toekenning van een onderhoudsoperatie. Er doet zich echter verschil voor in het soort operaties dat wordt toegekend.

De periodieke activiteit die binnen de DSM-methode wordt onderkend bestaat soms uit een verzameling operaties in plaats van één operatie per component. Zo worden revisies als operatie opgevoerd, terwijl onduidelijk is wat hier precies mee wordt bedoeld.

Het voorspellen van onderhoud met behulp van storingvoorspellende groot-

heden krijgt binnen DSM weinig aandacht. Dit komt omdat de inspectiesoorten (fysiek en functioneel) alleen iets zeggen over eventuele activiteiten die eerst uitgevoerd moeten worden voordat kan worden geïnspecteerd. De definitie zou veel meer aan moeten geven wat het resultaat moet zijn van de inspectie. Dit is wel het geval bij de definities binnen het ontwerp kader.

Daarnaast wordt binnen het OC van de DSM-methode niet aangegeven wat de vervolgactie moet zijn als inspecties zijn uitgevoerd.

ad 4.

Om de werklast per beurt te kunnen bepalen moet de werklast per onderhoudsregel bekend zijn. In de unit-norms zijn slechts voor sommige onderhoudsoperaties tijdsnormen vastgelegd. Voor de overige operaties is de tijdsduur binnen DSM niet bekend. De werklast wordt binnen DSM alleen per beurt bepaald/geschat.

Op dezelfde manier als bij de basisstoringsen moeten ook de karakteristieken van een onderhoudsregel worden vastgelegd. Een formulier dat dit bewerkstelligt kan worden afgeleid uit de attributen voor het entiteitstype Onderhoudsregel. Dit formulier is niet uitgewerkt omdat hieraan specifieke gegevens voor DSM zouden moeten worden toegevoegd. De voorbeeldfunctie vervalt daarmee bijna volledig.

ad 5.

Binnen DSM worden de set-ups niet expliciet vastgelegd. De enige uitzondering hierop is het feit dat wel aangegeven wordt of een beurt in of uit bedrijf of tijdens een stop plaatsvindt. Dit kan een set-up worden genoemd en is in ieder geval zeker een criterium waarop geclusterd wordt.

Wel worden door een werkschrijving per beurt te maken de arbeidskundige handelingen vastgelegd die een monteur uit moet voeren bij een onderhoudsoperatie. Het clusteren van onderhoudsregels op basis van de werkschrijving hangt dus volledig af van de kwaliteit van de werkvoorbereider.

ad 6.

Binnen de DSM-methode worden de onderhoudspakketten gevormd uit de totale verzameling onderhoudsregels. Binnen het ontwerp kader gebeurt het harmoniseren op een subset onderhoudsregels: namelijk alleen op die regels die ook een set-up hebben. (De vraag is of dit laatste efficiënt is. Door namelijk alleen pakketten te maken van de onderhoudsregels die geclusterd zijn rijst de vraag wat er moet gebeuren met de regels die wel een interval maar geen set-up hebben.) Daarnaast blijkt dat binnen DSM het clusteren van onderhoudsoperaties en het harmoniseren van onderhoudsregels wordt omgedraaid. Er wordt eerst op interval en vervolgens op in bedrijf / uit bedrijf / stop geselecteerd.

ad 7.

Het evalueren van de verzameling onderhoudsregels is een proces dat binnen DSM impliciet wordt gedaan. Uiteraard wordt wel bij het uitvoeren van de beurten gecheckt of er voldoende materiaal en capaciteit aanwezig is, maar dit gebeurt in het kader van de werkvoorbereiding en niet vanwege een technische of organisatorische evaluatie van het onderhoudsconcept.

Ook de kosten van het onderhoudsconcept worden niet geëvalueerd omdat de gegenereerde verzameling onderhoudsregels minimaal noodzakelijk is voor de instandhouding van het object.

Anderzijds moet ook worden gesteld dat natuurlijk geen beurten gemaakt worden die niet uitvoerbaar zijn. De werkvoorbereider houdt als het ware tijdens het samenstellen van de beurten intuïtief rekening met technische en economische criteria.

ad 8.

Binnen de resultatenanalyse is voor de terugkoppeling ten aanzien van het onderhoudsconcept vooral de technische analyse van belang.

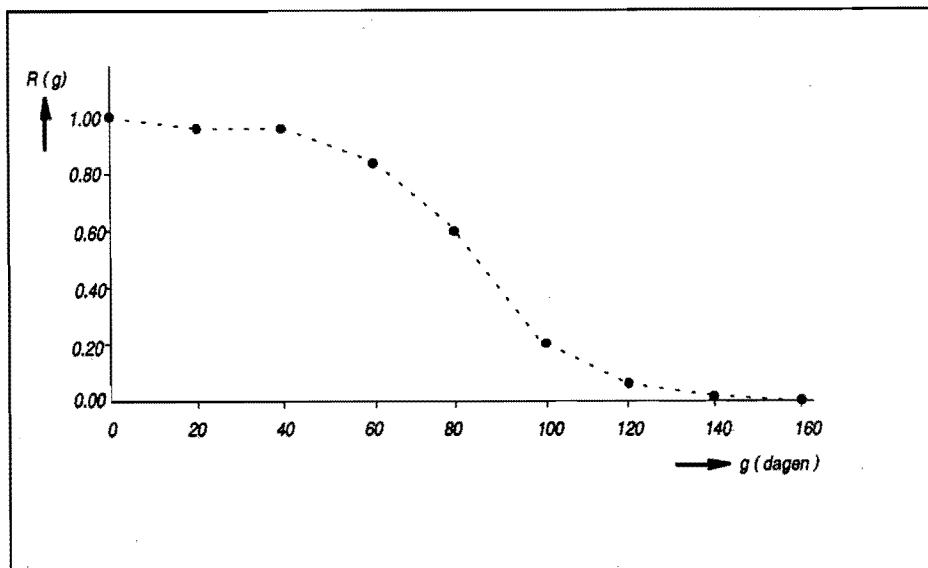
Eén van de belangrijkste activiteiten binnen de technische analyse is het bepalen van het onderhoudsinterval. Tot zover stemmen DSM-methode en decompositie overeen. De manier waarop dit interval wordt berekend verschilt echter. Binnen DSM vergelijkt de ME bij een storing de stilstandtijd van een object, die door Productie geregistreerd moet worden, met de vorige soortgelijke storing. Afhankelijk van het aantal eerder geregistreerde storingen en de consequenties van de storing past de ME *op eigen beoordeling* het interval aan. Dit is ten eerste een subjectieve beslissing. Ten tweede wordt geen rekening gehouden met het feit dat een storingsgraad van een systeem kan veranderen. En juist met dit instrument moet beoordeeld worden of preventief onderhoud nog steeds zinvol is.

Er zou echter met de realisatie van de storing opnieuw de storingsgraad moeten worden berekend. Zodoende kan er antwoord worden gegeven op de vraag of preventief onderhoud nog steeds zin heeft. Vervolgens kan het interval worden bepaald door een afweging te maken met behulp van de overlevingskarakteristiek. Deze geeft aan hoeveel procent van de componenten, sinds nieuw, tenminste een bepaalde tijdsduur zal functioneren.

Een voorbeeld verduidelijkt dit.

In figuur 2 is een overlevingskarakteristiek geschetst. Hierin blijkt dat met een inspectie-/reparatie-interval van 80 dagen, 60% van de componenten nog zal functioneren, terwijl aan 40% de basisstoring is opgetreden. De ME moet beslissen of hij deze kans acceptabel vindt.

Zowel de storingsgraad als de overlevingskarakteristiek kunnen met behulp van de methode van Nelson worden berekend. Deze methode wordt geïllustreerd door Geurts².



Figuur 2. Voorbeeld van een overlevingskarakteristiek

Naast het feit dat de technische analyse in de diepte (inhoudelijk) moet worden aangepast, zal ook in de breedte een wijziging moeten plaats vinden. Per vakrichting en per fabriek vindt de registratie van de onderhoudshistorie op een andere manier plaats. Sommige engineers hebben zelf een softwareprogramma ontwikkeld om de historie te registreren. Anderen houden archiefmappen bij terwijl soms voor een hele vakrichting een (klein) informatiesysteem is gebouwd. Het gevolg is dat engineers nauwelijks van elkaars kennis kunnen gebruik maken. Er bestaat immers geen algemene duidelijkheid over wie, wat, waarom wil registreren.

Als eerste moet (bij een werkopdracht) worden teruggekoppeld naar de consequenties waarop een storing wordt beoordeeld (zie tabel 2).

Voor de produktiedervingskosten en de veiligheidsconsequenties zijn hierbij de bottleneck. Beide moeten worden geregistreerd door Produktie. Voor de eerste zijn de stilstandsuren een maat (vermenigvuldigd met de brutomarge). Voor de veiligheidsconsequentie bestaat een veelheid aan regels die niet gemakkelijk toepasbaar zijn. Dit systeem moet worden vereenvoudigd door bijvoorbeeld aan een storing een veiligheidsgetal toe te kennen, zoals nu ook bij de COSO's gebeurt. De materialen en gewerkte uren moeten worden geregistreerd door de monteur op de werkorder waarna de werkvoorbereider de materiaal- en loonkosten bepaalt. Verder moet de monteur aangeven wat de oorzaak van de storing is, welke toestand van het systeem is geconstateerd en welke acties hij ondernomen heeft om de storing op te heffen. Dit kan worden gerealiseerd door hem op het registratieformulier deze zaken via trefwoorden te laten invullen. Door dit

proces te automatiseren bestaat de mogelijkheid om de invuldiscipline te verbeteren doordat de monteur verplicht kan worden om bepaalde velden op het terugkoppelings formulier in te vullen.

(Dat deze invuldiscipline kan worden verbeterd heeft als voornaamste oorzaak dat monteurs geen resultaat zien van hun inspanningen omdat de ME geen tijd en geen mogelijkheid heeft om de technische analyse goed uit te voeren).

De gevolgschade zal de ME zelf moeten aangeven. Uit de toestand van het object en de diagnose van de storing moet de ME vastleggen wat direct en wat indirect het gevolg is van de basisstoring.

N.B. Bij de uitvoering van preventief onderhoud gaat het alleen om een beschrijving van de toestand van het object en om de uitgevoerde onderhoudsregels. Deze gegevens kunnen wel op hetzelfde terugkoppelingsformulier worden geregistreerd.

Tot slot moet nog worden opgemerkt dat bovenstaande gegevens geaggregeerd moeten worden zodat overzichten van objecten of objecttypen ontstaan. Hiermee kan worden beslist of een object niet van urgentie is veranderd. Als dit wel het geval is, en een object is bijvoorbeeld van klasse 2 naar klasse 1 verschoven, dan moet het standaard onderhoudsconcept worden vervangen door een volledig concept volgens het ontwerp kader.

4. Vergelijking van TEROMAN met het gecomponeerde ontwerp kader voor het onderhoudsconcept

De vergelijking van beide methoden zal op dezelfde wijze geschieden als in hoofdstuk 3. Toch kan worden gesproken van een accentverschil ten opzichte van de vorige paragraaf. Daar luidt de vraag: zijn de processen uit de DSM-methode inpasbaar in het ontwerp kader? Hier gaat het om de vraag: kan een proces uit het ontwerp kader met behulp van Teroman worden uitgevoerd?

Om deze laatste vraag te beantwoorden zijn de volgende symbolen gehanteerd:

- V : Proces uit het ontwerp kader wordt volledig ondersteund door Teroman.
- G : Proces uit het ontwerp kader wordt gedeeltelijk ondersteund door Teroman.
- NT : Proces uit het ontwerp kader wordt niet ondersteund door Teroman.
- NO : Proces uit Teroman behoort niet tot het ontwerp kader voor het onderhoudsconcept.

In de toelichting bij tabel 3 zullen alleen de G- en NT markeringen worden geëxpliceerd. Als een proces volledig wordt ondersteund door Teroman, is toelichting overbodig terwijl een proces uit Teroman dat niet in het ontwerp kader aan-

wezig is, binnen dit rapport geen aandacht krijgt omdat het ontwerp kader van de TUE normatief is.

Net als bij de vergelijking in de vorige paragraaf zal ook hier geen gestructureerde analyse plaatsvinden van de verschillen en overeenkomsten ten aanzien van de attributen en entiteitstypen. Toch zal hieraan meer aandacht worden besteed dan in het vorige hoofdstuk.

Eenzijds is het datamodel van Teroman bekend en hoeft dus niet te worden gemaakt zoals wel het geval was met datamodel van de DSM-methode.

Anderzijds ligt bij informatiesystemen in veel gevallen het datamodel ten grondslag aan het feit dat een bepaald proces niet wordt uitgevoerd of kan worden uitgevoerd.

Tabel 3.

	Werkaan- vraag accep- teren & voorbereiden	Genereer onderhoud- sconcept & TVB	Genereer planmatig onderhoud	Plan onder- houd	Geef Werk- Opdracht (WO) uit	Controleer voortgang en meldt WO gereed	Maak budget	Resultaten- analyse
TS-analyse		G ¹						
Bedrijfsanalyse								NT2
Initieer onderhoud								NT ³
Operationaliseer onderhoud		G ⁴						
Limiteer onder- houdsintervallen		G ⁴						
Definieer onder- houdsregel		G ⁴						
Cluster onder- houdsoperaties			G ⁵					
Harmoniseer onderhoudsin- terval			G ⁵					
Groep onder- houdsoperaties			V					
Evalueer onder- houdsregels								G ⁶
Resultatenanalyse	G ⁷							
	NO			NO	NO	NO	NO	

Toelichting bij de cijfers uit tabel 3:

ad 1.

Binnen Teroman kan alleen een fysieke analyse van het object worden uitgevoerd:

- Bepaling van de urgentie van het object is niet goed mogelijk omdat het entiteitstype Basisstoring (binnen Teroman is dit het entiteitstype Bevinding) alleen wordt gekenmerkt door het attribuut tekstregel.

Storingsconsequenties, storingsvorm en storingsgedrag kunnen dus alleen via de text processing utility worden verwerkt. Ook normen ten aanzien van de consequenties van basisstoringen ontbreken in Teroman. Het behoeft geen toelichting meer dat deze wel geregistreerd zouden moeten zijn

- Een functionele analyse kan niet plaatsvinden omdat het attribuut functie van een object niet gedefinieerd is binnen het entiteitstype Onderhoudsobject.
- Analyse van de basisstoringen is niet mogelijk. De reden is hierboven al genoemd. Alleen de oorzaak van een storing kan worden vastgelegd. Wat de gevolgen van deze gebreken zijn, is al beschreven in de vorige paragraaf.

ad 2.

Dit proces zou alleen kunnen worden uitgevoerd als alle veiligheidseisen en onderhoudsvoorschriften in Teroman opgevoerd zouden worden. Uiteraard heeft dit geen zin. De bedrijfsanalyse moet dus buiten Teroman om gebeuren. Alleen het resultaat ervan, basisstoringen en onderhoudsregels, moeten worden vastgelegd.

ad 3.

Er kan binnen Teroman geen algoritme gedefinieerd worden dat een elementaire onderhoudsregel toekent aan een basisstoring. Dat dit proces wel geautomatiseerd kan worden toont Maas⁶ aan.

Dit betekent dat een van de meest essentiële stappen van het ontwerp kader niet in Teroman vastligt of kan worden vastgelegd.

ad 4.

Het operationaliseren van de onderhoudsregels, het limiteren van de onderhoudsintervallen en het definiëren van de onderhoudsregels kan alleen met de text processing utility gebeuren. (Alleen de beurten, SWO's, kunnen in Teroman worden vastgelegd) De basishandelingen (read, delete, update en create) die op de individuele attributen van het entiteitstype Onderhoudsregel zouden moeten kunnen worden uitgevoerd, hebben binnen Teroman geen betekenis.

ad 5.

Het gevolg van de constatering uit stap 4 is dat de onderhoudsclusters en -pakketten niet automatisch door Teroman, via een eenvoudig zoek-commando op clusternummer en interval, kunnen worden gegenereerd.

De ME/werkvoorbereider moet zelf set-ups definiëren voor onderhoudsactiviteiten en hier 'zo goed mogelijk' op clusteren. Hetzelfde geldt voor de onderhoudspakketten.

ad 6.

Het evalueren van de onderhoudsregels is een proces dat nauwelijks is te automatiseren. Er kunnen bijvoorbeeld wel kwantitatieve randvoorwaarden (normen) worden gedefinieerd, waarop Teroman dan een controle kan uitvoeren. Maar dan nog is de steun van de werkvoorbereider onontbeerlijk. Binnen DSM wor-

den geen Standaard WerkOpdrachten (SWO) gemaakt die technische of organisatorisch niet haalbaar zijn. De werkvoorbereider voert dus zelf steeds deze control uit.

Ditzelfde geldt voor de werkvoorbereiding van de SWO's. Teroman checkt niet automatisch of voor een beurt de juiste hulpmiddelen en/of materialen aanwezig zijn. Dit is een handmatige controle die met behulp van checklisten door de werkvoorbereider zelf wordt uitgevoerd.

ad 7.

De resultatenanalyse wordt door Teroman ondersteund via diverse rapporten. Zo kan de werkvoorbereider een overzicht van de uitgevoerde werkopdrachten maken om inzicht te krijgen in de materiaal- of loonkosten over een bepaalde maand.

De ME kan overzichten per object of groep van objecten maken. Zo kan hij alle acties bekijken die het gevolg zijn van preventief onderhoud. Of overzichten die de geconstateerde toestand van bepaalde componenten weergeven etc.

Wat echter ontbreekt is dat de beslissing ten aanzien van onderhoudsintervallen niet ondersteund wordt. De ME moet zelf uit de bevindingen van de monteur intervallen afleiden. Het berekenen van storingsgraden en overlevingskarakteristieken is niet in Teroman aanwezig.

Afsluitend kan dus worden gesteld dat Teroman goed hulp biedt bij het groeperen van onderhoudsregels en gedeeltelijke ondersteuning biedt bij de resultatenanalyse. De overige processen, met uitzondering van de fysieke analyse, zijn niet of nauwelijks in Teroman aanwezig. Toch moet worden opgepast om een volledig waarde-oordeel over Teroman uit te spreken.

Er is immers weinig aandacht geschonken aan de entiteitenanalyse. Wat dus precies de invloed is van het niet uit kunnen voeren van bepaalde processen op de gegevensstromen, moet nader worden bekeken. Aan de andere kant zal het resultaat van een dergelijk onderzoek niet meer zijn dan een aanvulling/verfijning op bovenstaande conclusie.

5. Conclusies

-- Conclusies ten aanzien van de vergelijking tussen DSM-methode en ontwerp kader

– Elke Maintenance Engineer (ME) hanteert zijn eigen methode bij het opstellen van onderhoudsconcepten binnen DSM. Er is dus niet sprake van een éénduidige methode over heel de divisie Kunststoffen.

Door de introductie van het ontwerp kader is éénduidig de werkwijze vastgelegd die moet worden gehanteerd bij het genereren van onderhoudsconcepten.

Binnen DSM is men het over algemeen eens over deze methode. Door de introductie van het ontwerpkader is een basis gelegd voor implementatie. Hierbij kan automatisering, zij het in bescheiden mate, een hulpmiddel zijn.

Toch bestaat er ook kritiek ten aanzien van de methode:

- De benodigde tijdsduur voor het opstellen van een volledig onderhoudsconcept zou te lang zijn.
 - Het volledig karakteriseren van de basisstoringen is in veel gevallen niet mogelijk omdat gegevens ontbreken.
 - Het initiëren van het onderhoud is te subjectief.
 - De terminologie is verwarrend en kost veel tijd om haar volledig te begrijpen.
- Hoewel niet al deze kritiek terecht is, moet hieraan tijdens de implementatie zorgvuldig aandacht worden besteed.

– Binnen DSM gebeurt veel op ‘ervaring’. De informatiestromen die moeten leiden tot het opstellen van een onderhoudsconcept zijn te weinig geformaliseerd. Alleen het eindresultaat, het onderhoudsconcept, ligt formeel vast. De belangrijkste gegevens die alleen impliciet bekend zijn, terwijl zij formeel vast moeten liggen, zijn:

- de consequenties van storingen in termen van produktieverlies, veiligheid, materiaalkosten, loonkosten en gevolgschade.
- normen om bovengenoemde consequenties te kunnen beoordelen deze zullen per fabriek anders zijn.
- de set-ups om hiermee efficiënt beurten te kunnen samenstellen.

– Op basis van het ontwerpkader moeten aan componenten storingen worden gekoppeld. Vervolgens worden aan de storingen onderhoudsregels verbonden. Binnen DSM is men geneigd om over de koppeling componenten-storingen heen te lopen en direct onderhoudsregels aan een component toe te kennen.

– De terugkoppeling van het uitgevoerde onderhoud naar de ME toe, is per fabriek en vakdiscipline anders georganiseerd. Bovendien bestaat er geen duidelijkheid over wat geregistreerd moet worden zodat analyse moeilijk is.

– Het onderhoudsinterval is binnen DSM een beslissing van de ME. Er is geen tool aanwezig om deze intervallen op een objectieve manier te bepalen.

– *Conclusies ten aanzien van de vergelijking tussen TEROMAN en ontwerpkader*

– Binnen Teroman zijn de onderkende processen van het ontwerpkader niet aanwezig:

- individuele onderhoudsregels (met hun attributen) kunnen binnen Teroman niet worden vastgelegd. Het is alleen mogelijk om een onderhoudsactiviteit via Standaard Werkopdrachten vast te leggen.

Het onderhoudsconcept kan alleen via een tekstverwerkings faciliteit worden gecreëerd

- het vastleggen van het entiteitstype basisstoring met zijn voornaamste attributen is niet mogelijk.
 - een algorithmische om een elementaire onderhoudsregel toe te kennen aan een storing, kan binnen Teroman niet gedefinieerd worden. De elementaire onderhoudsregel kan zelfs niet als attribuut van een onderhoudsregel worden onderkend.
 - Het groeperen van onderhoudsoperaties op basis van setup en interval wordt door Teroman niet ondersteund.
- Wat een storing in termen van produktiederving heeft gekost kan niet worden geregistreerd. Alleen de consequenties ten aanzien van materiaal- en loonkosten kunnen worden vastgelegd.
- Er kan geen algorithmische worden gedefinieerd om uit de onderhoudshistorie van een object een onderhoudsinterval te bepalen

Literatuur

1. L. Essink & H. Romkema, *Ontwerpen van informatiesystemen: een cursus gebaseerd op: ISAC, NIAM, Information Engineering, SA/SD, JSD en SDIII*, Academic Service, Schoonhoven, 1989.
2. Dr. ir. J.H.J. Geurts, *Grafische methoden*, D5010, in: Lamberti c. s. (red.), *Onderhoudsmanagement, Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987.
3. Dr. ir. C.W. Gits, *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept; een kader*, D3010, in: Lamberti c.s. (red.), *Onderhoudsmanagement, Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987.
4. Ir. N.J.W. Greveling & Dr. P.A.M.N. van der Poel, *Referentiemodellen: een overzicht*, Informatie, jaargang 30, nr. 4, blz. 249-328, 1988.
5. R.H.W.A. Jansen, *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept: een vergelijking tussen de huidige DSM methode en de methode volgens het aangepaste ontwerp kader van de TU Eindhoven*, afstudeerrapport Hogeschool voor Petroleum- en Gastechologie, Den Helder, 1990.
7. Ir. H.H. Martin, *Evaluatiemethoden voor standaard soft-ware*, G8020, in: Lamberti c. s. (red.), *Onderhoudsmanagement, Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987.
8. Ir. Y.N. Tan, *Een geval van een integraal onderzoek in de onderhoudsfunctie*, F9010, in: Lamberti c.s. (red.), *Onderhoudsmanagement, Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*, Alphen aan den Rijn, Samsom Uitgeverij, 1987.

Het optimaliseren van integrale onderhoudsafhankelijke kosten

29

Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport van ir. S. Breure en samengevat en bewerkt door ing. E.J.L. Lamberti

Dit artikel is afgeleid van een afstudeerproject¹ dat heeft plaatsgevonden bij de Produktgroep Verpakkingstaal (PG VPS) van Hoogovens IJmuiden.

De afstudeeropdracht – waarover in het onderhoud-artikel wordt gerapporteerd – had betrekking op een onderzoek naar de procedures en voorwaarden om de integrale onderhoudsafhankelijke kosten te kunnen verlagen.

Gedurende de laatste jaren wordt er in de literatuur steeds meer aandacht geschonken aan de onderhoudsproblematiek. Met name de Japanse succesverhalen spreken menigeen tot de verbeelding. Deze aandacht is begrijpelijk aangezien de onderhoudskosten verantwoordelijk zijn voor een aanzienlijk aandeel in de totale kosten.

Zo bedraagt het aandeel in de totale kostprijs in de staalindustrie, zelfs tussen de 8 en de 15 procent.

1. Inleiding

Naast het kostenaspect is er ook sprake van een aantal ontwikkelingen rond de produktie. Door de hoge eisen die de markt stelt aan de flexibiliteit, de leverbetrouwbaarheid, de kwaliteit en de prijs, worden hoge eisen gesteld aan de produktie. Deze eisen werken door naar het onderhoudsproces: naast de efficiëntie (de kosten) dient tevens de installatie performance (waaronder de bedrijfszekerheid) door het onderhoud te worden gegarandeerd.

Om zowel de effectiviteit (performance) als de efficiëntie te kunnen 'gieten' in één begrip, definiëren we het begrip Integrale Onderhoudsafhankelijk Kosten (IOK). Onder integrale onderhoudsafhankelijke kosten worden zowel de *directe* kosten, zoals materialen, manuren etcetera, als de *indirecte* kosten verstaan. Onder de indirecte kosten worden de gevolggkosten van het onderhoudsproces verstaan zoals stilstandskosten (gederfde produktie-uren), kwaliteitsverliezen door storingen enzovoort.

In dit artikel worden eerst de factoren behandeld, die de integrale onderhoudsafhankelijke kosten bepalen. Vervolgens wordt de procedure beschreven die tijdens het onderzoek ontwikkeld is om deze kosten te verlagen. Voor de invoering van de procedure moet er aan een aantal voorwaarden worden voldaan. Deze voorwaarden worden tenslotte beschreven.

2. Factoren die de onderhoudsafhankelijke kosten bepalen

In een productieorganisatie zijn er vele factoren, die de Integrale Onderhoudsafhankelijke Kosten beïnvloeden.

De belangrijkste factoren zijn:

- de gebruiksomstandigheden
- de onderhoudsmiddelen
- het onderhoudsconcept
- het ontwerp van de technische systemen
- de constructie van de technische systemen.

Onder *gebruiksomstandigheden* kunnen bijvoorbeeld: de bedieningswijzen

en de *productieomstandigheden* worden verstaan.

De *onderhoudsmiddelen* bestaan vooral uit het personeel en de technische hulpmiddelen.

Het *onderhoudsconcept* bestaat uit de verzameling regels over de momenten, en alsdan welk onderhoud aan een technisch systeem moet worden uitgevoerd.

Het *ontwerp* van de installatie beschrijft het proces volgens welke de functie van een bepaald systeem vervuld wordt, in samenhang met de technische specificatie van het proces.

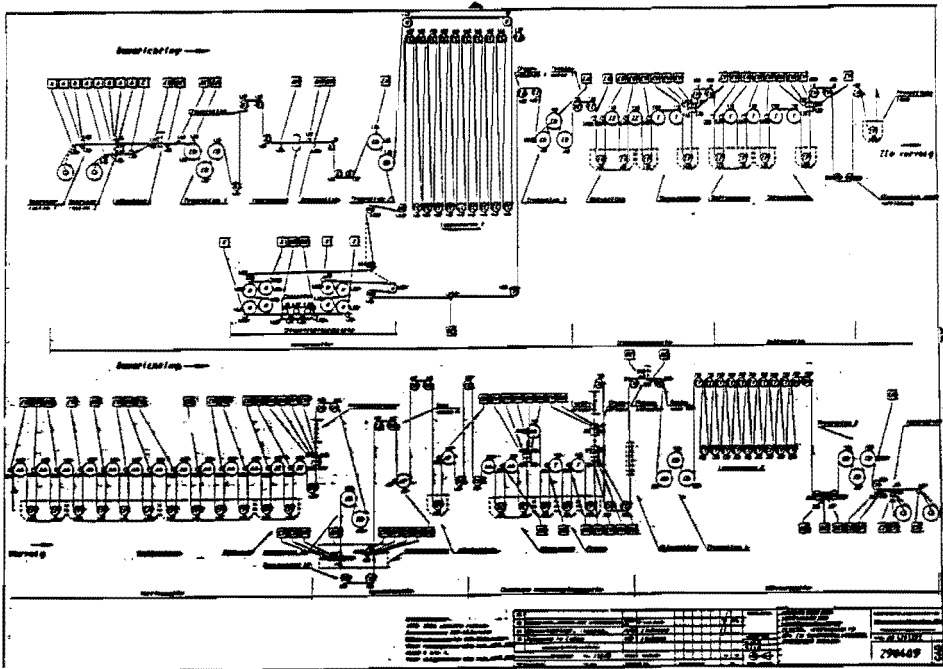
Een voorbeeld is het knippen van staalband met een roterende schaar als proces, en het gebruikte materiaal (gehard staal) en de afstelling (ruimte tussen de knipbladen) en 'overspeed' (trek) als technische specificatie.

De *constructie* geeft tenslotte de (de)montagevriendelijkheid (de onderhoudbaarheid) van het subsysteem aan, die de reparatietijden in grote mate bepaalt.

Als we de integrale onderhoudsafhankelijke kosten willen verlagen dienen we deze vijf factoren optimaal op elkaar af te stemmen. De vraag die dan onmiddellijk naar voren komt is: hoe stemmen we deze factoren af, zodat de integrale onderhoudsafhankelijke kosten geoptimaliseerd worden ?

Deze vraag was ook de opdracht die aan het afstuderproject ten grondslag lag, toegespitst op een Electrolytische Vertinlijn (figuur 1) van de Produktgroep Verpakkingstaal van een staalfabriek.

In deze Produktgroep was er behoefte aan een methodiek, waarmee de Technische Dienst meer grip kan krijgen op de bovengenoemde vraag.



Figuur 1. De electrolytische vertinlijn

3. De procedure

Aangezien de vertinlijnen bijzonder omvangrijke en complexe installaties zijn, is het vrijwel onmogelijk om een lijn in zijn geheel te analyseren. Nadat was aangetoond dat een beperkt aantal van de installatiedelen verantwoordelijk was voor het merendeel van de onderhoudsproblemen (Pareto-analyse) werd besloten om een partiële aanpak te volgen, waarbij de installatiedelen worden onderzocht, die de meeste problemen (storingen) veroorzaken en dus de grootste 'bijdrage' leveren in de integrale onderhoudsafhankelijke kosten.

Het doel van het onderzoek was het ontwikkelen van een procedure, waarmee de integrale onderhoudsafhankelijke kosten worden verlaagd en die kan worden gevolgd door o.a. de Technische Dienst.

De procedure bestaat uit de onderstaande fasen, die achtereenvolgens doorlopen

worden. Daarbij is een duidelijke gebruiksaanwijzing ontwikkeld, waarin men de gegevens die men gebruikt tijdens de procedure, moet invullen.

- de *selectiefase*,
waarin wordt afgebakend welke objecten nader worden geanalyseerd. De objecten worden geselecteerd op basis van de selectieparameters (in ons geval; aantal stilstanden en stilstandsduur, veroorzaakt door de individuele subsystemen)
- de *storingsoorzaak-analysefase*,
waarin van het geselecteerde object wordt onderzocht wat de oorzaak van het optreden van de storingen is
- de *onderhoudsconceptfase*,
waarin een kosten-optimale onderhoudsregel wordt opgesteld
- *evaluatiefase van het ontwerp*,
waarin gekeken wordt of het ontwerp niet kan worden gemodificeerd om de IOK te verlagen
- *gebruiksomstandigheden evaluatiefase*,
waarin gepoogd wordt de IOK te verlagen door het aanpassen van de omstandigheden
- de *redundantiefase*,
waarin de aanwending van redundantie wordt onderzocht
- de *analysefase van de onderhoudbaarheid*,
waarin verbeteringsvoorstellen om reparatietijden te verminderen worden opgesteld
- de *implementatiefase*,
waarin de rendabele voorstellen worden geïmplementeerd
- de *na-evaluatiefase*,
waarin de gerealiseerde effecten van de geïmplementeerde voorstellen worden vergeleken met de verwachte effecten.

Het geselecteerde installatiedeel wordt vervolgens als storingsbron aangemerkt.

- *Toelichting op de procedure*

Om de selectiefase snel te kunnen doorlopen zal met behulp van een standaardrapportage in de database, de hoogte van de selectieparameters in kaart moeten kunnen worden gebracht. In ons geval waren de selectieparameters het aantal storingen en de totale stilstandsduur, die veroorzaakt waren door de afzonderlijke subsystemen. Zodoende moeten dus alle storingen worden geregistreerd in de database (storings-meldsysteem) inclusief (de hoogte van) de selectieparameters.

Als de storingsbronnen zijn geselecteerd moeten de oorzaken van de opgetreden storingen worden onderzocht. De oorzaken van de storingen dienen dus ook in

het storingsmeldsysteem te zijn vastgelegd en via een standaardrapportage uit het systeem zijn te verkrijgen.

In de onderhoudsconceptfase moet er een optimale onderhoudsregel voor het betreffende installatiedeel worden ontworpen. Dit kan worden gedaan met de theorie van Gits². Aangezien er van het storingsgedrag van de installatie veel gegevens voorhanden zijn, werd besloten het ontwerp van onderhoudsregel met software te ondersteunen. Met deze software kunnen op basis van historische storingsgegevens, optimale vervangingsintervallen worden berekend, in geval van een stijgende storingsgraad (GAO).

Er zijn pakketten beschikbaar die op basis van de storingsgeschiedenis van een installatiedeel, de betreffende statistische levensduurverdeling kunnen schatten. Als de levensduurverdeling bekend is, kan men na invoering van de kosten van zowel preventieve als correctieve onderhoudsactiviteiten, de vervangings- of inspectieintervallen optimaliseren met de bijbehorende integrale onderhoudsafhankelijke kosten per tijdseenheid. Aangezien het pakket dat wij aangeschaft hebben, alleen vervangingsintervallen kan optimaliseren, hebben wij zelf het inspectiemodel ontwikkeld op basis van de literatuur van Christer⁵ en dit model uitgewerkt in een programma. Met het aangeschafte programma kunnen op basis van historische storingsgegevens in geval van een stijgende storingsgraad optimale vervangingsintervallen worden berekend.

In geval van de aanwezigheid van een storingsvoorspellende grootheid berekent het andere programma optimale inspectieintervallen, met de daarbij behorende integrale onderhoudsafhankelijke kosten, rekening houdend met bestaande geplande stilstanden voor preventieve activiteiten aan andere installatiedelen. Als er geen sprake is van een stijgende storingsgraad en er is geen storingsvoorspellende grootheid, worden de kosten van storingsafhankelijk onderhoud geschat.

Als de optimale onderhoudsregel bekend is kunnen de rentabiliteit van modificaties van het onderwerp worden geëvalueerd. Een modificatie zal namelijk een bepaald type storing voorkomen. Deze storingskosten moeten dan als gecensureerde waarde⁶ in het programma worden ingevoerd. Dit heeft invloed op de levensduurverdeling van het betreffende installatiedeel en dus op de onderhoudsregel en onderhoudsafhankelijke kosten. Als de (geschatte) daling van de onderhoudsafhankelijke kosten bekend is kan de terugverdientijd van de modificatie eenvoudig worden bepaald (de oorspronkelijke kosten dienen als referentiekader). Bij een acceptabele terugverdientijd wordt het modificatievoorstel als geïmplementeerd beschouwd en worden de nieuwe onderhoudsafhankelijke kosten het referentiekader voor de evaluatie van de voorstellen uit de volgende fase. Natuurlijk wordt het nieuwe statistische storingsgedrag tevens de nieuwe uitgangssituatie.

Hetzelfde kan worden gedaan voor de (beïnvloedbare) externe factoren die ook het storingsgedrag beïnvloeden. Hierbij kunnen we denken aan bedieningsfou-

ten, montagefouten, het indringen van vreemde stoffen, water en dergelijke. Voor de storingsbronnen, waarvan het storingsgedrag niet op een rendabele wijze kan worden verbeterd, kan redundantie worden aangewend. Dit blijkt binnen de vertinnerij echter slechts zelden een rendabele oplossing te zijn. Tenslotte kan worden gepoogd de reparatietijden te verkorten. Hierdoor zullen de indirecte onderhoudsafhankelijke kosten van storingen verminderen. De rentabiliteit kan in beide gevallen worden geschat met behulp van de software.

Als de voorstellen gegenereerd zijn dienen de rendabele voorstellen geïmplementeerd te worden. Hiertoe worden de voorstellen op een standaardformulier gepresenteerd aan de geautoriseerde mensen. Dit formulier bevat een omschrijving van de voorstellen, de 'oude' en de 'nieuwe' onderhoudsregel en integrale onderhouds-afhankelijke kosten en de terugverdientijd van de voorstellen met eventueel een optimistisch en een pessimistisch scenario. De terugverdientijd is een acceptabel criterium om voor te stellen omdat met meer geavanceerde kengetallen (Net Present Value, Kontante Waarde etc.) er een onterechte nauwkeurigheid wordt gesuggereerd.

Tenslotte dienen de geïmplementeerde voorstellen te worden geëvalueerd. Dit kan eenvoudig gebeuren omdat we periodiek de bovengenoemde procedure doorlopen. In de selectiefase kunnen we kijken in welke mate het aantal storingen en de stilstandsduur – veroorzaakt door een behandelde storingsbron – gedaald zijn. Dit kunnen we eenvoudig doen door de grootte van de selectiegrootheden per maand in een staafdiagram weer te geven.

4. Voorwaarden met betrekking tot de procedures

Om de bovengenoemde procedure succesvol te kunnen doorlopen moet er zijn voldaan aan een aantal voorwaarden. Deze voorwaarden worden per groep behandeld.

– Voorwaarden met betrekking tot de analyse software

In het onderhoudsproces heeft de computer reeds lang zijn intrede gedaan. De nadruk van de applicaties ligt vooral op het terrein van de administratie, planning en documentatie.

De bijdrage van de computer bestaat uit het verzekeren dat de activiteiten goed worden gepland, voorbereid en geregistreerd. Meer aandacht dient echter te worden geschonken aan de vraag: *doen we wel de juiste dingen ?*

Er zijn enkele pakketten beschikbaar die op basis van de storingsgeschiedenis van een installatiedeel, de betreffende statistische levensduurverdeling (Weibull)

kunnen schatten en tevens toetsen of het storingsgedrag de voorgestelde verdeling volgt. Als de levensduurverdeling bekend is kan men na invoering van de kosten van zowel preventieve als correctieve onderhoudsactiviteiten, de vervangings- of inspectieintervallen optimaliseren met de bijbehorende integrale onderhoudsafhankelijke kosten per tijdseenheid.

De software moet tevens rekening houden met het effect op de kosten als we een preventieve activiteit onderbrengen in geplande stilstand, waarin preventieve onderhoudsactiviteiten aan andere installatiedelen plaatsvinden. Hierdoor worden de gevolgen van de onderhoudsactiviteiten namelijk verdeeld over verscheidene activiteiten.

In één stilstand vinden immers meerdere activiteiten plaats. Als benadering van de 'incentive' van het plaatsen van een preventieve activiteit in zo'n stilstand, worden de indirecte kosten van de betreffende activiteit gedeeld door het aantal andere activiteiten dat plaatsvindt.

Hierbij gaan we er dus vanuit dat de totale stilstandsduur van de geplande stilstand, door het toevoegen van één activiteit, slechts verwaarloosbaar toeneemt.

Naast de functionele eisen die men aan een dergelijk pakket kan stellen is een grote gebruikersvriendelijkheid noodzakelijk.

Aangezien men een toepassing wenste binnen de termijn van het afstudeerproject (acht maanden), werd besloten de software te kopen. Het ontwikkelen van een eigen pakket is immers een tijd rovende kwestie, waarvan de duur betrekkelijk moeilijk is te voorspellen. Tijdens het selecteren van een pakket werd duidelijk dat het aanbod op de markt van dergelijke pakketten bijzonder beperkt is.

Daar het pakket dat is aangeschaft alleen vervangingsintervallen kan optimaliseren (GAO), is zelf het aanvullende inspectie model (TAO) ontwikkeld op basis van de literatuur van Christer⁵. Dit model is uitgebreid in onderling overleg met Christer en uitgewerkt in een software-applicatie.

– *Voorwaarden met betrekking tot het storingsmeldsysteem*

Het storingsmeldsysteem moet onder meer de onderstaande standaardoverzichten kunnen genereren:

- de hoogte van de afzonderlijke selectiegrootheden per installatiedeel per maand
- per opgetreden storingen aan het geselecteerde installatiedelen: de oorzaak, datum van de storing, beschrijving van de bevindingen en de getroffen maatregel.

Het eerste standaardoverzicht bleek beschikbaar te zijn. Het tweede daarentegen

is volgens de opgestelde functionele specificatie ontwikkeld. Een grote meevaller hierbij was dat de benodigde gegevens binnen de data base al 'aanwezig' waren.

– *Voorwaarden met betrekking tot de installatiecodering*

Met behulp van de bovengenoemde standaardrapportages kunnen storingsbronnen worden geselecteerd en geanalyseerd. Teneinde de standaardrapportages te kunnen invoeren dient de codering van de installatie hiërarchisch te zijn opgebouwd. Dit wil zeggen dat een codenummer bestaat uit onder andere de volgende gedeelten:

- een *installatie-identificatienummer*,
dit geeft aan welke installatie in een subsysteem zit
- een *plaatscode*,
welke aangeeft in welk deel van de installatie het sub-systeem zit (bijvoorbeeld intree-sectie, midden-sectie en uitree-sectie)
- een *substeemcode*,
die aangeeft welke functie het subsysteem vervult (bijvoorbeeld de lasmachine, die de staalband van de inzetrollen aan elkaar last)
- de *specifieke onderdeelcodes*,
die aangeeft welke onderdelen in het subsysteem zitten, gebaseerd op de functie die de onderdelen vervullen (bijvoorbeeld het frame van de laswagen). Deze code laat zich verder specificeren tot de kleinste component.

Een voorbeeld van een code is: Codenummer: 25 11 24 02 *

Omschrijving: Onderdeel ** van het frame van de lasmachine van de intreesectie van de Elektrolytische Vertinlijn 13.

Gedeelte:	Code:	Beschrijving:
1.	25:	Elektrolytische Vertinlijn 13
2.	11:	Intree-sectie
3.	24:	Lasmachine
4.	02:	Frame van laswagen
	**:	Onderdeel ** van frame

Alle coderingen van de Elektrolytische Vertinlijn 13 beginnen met 25. De lasmachine van Elektrolytische Vertinlijn 12 is bij voorbeeld 241124. Zodoende kunnen we het storingsgedrag van de lasmachines van de verschillende lijnen eenvoudig vergelijken. Alle frames hebben 02 als onderdeelcode, zodat het begrijpen van de codes wordt vereenvoudigd.

Voor de selectie van subsystemen kijken we op het derde niveau. De individuele storingen moeten echter op het hoogste (component-)niveau worden geanalyseerd in verband met de statistische nauwkeurigheid (superpositie van meerdere

typen storingen). De codering van de installaties bleek geschikt te zijn voor de toepassing van de procedures.

– *Voorwaarden met betrekking tot de organisatie*

In de praktijk blijkt de Technische Dienst vooral bezig te zijn met het ‘blussen van branden’, zodat er weinig tijd overblijft voor het voorkomen van storingen. Aangezien het structureel bekijken van de IOK bepalende factoren een tijdrovende bezigheid is, dienen de uitvoerende en de beherende taken van de Technische Dienst te zijn gescheiden. Onder de beherende taken verstaan we bijvoorbeeld het bewaken van het onderhoudsuitvoering, installatie performance. Het onderhoudsbeheer treedt dus eigenlijk op als manager, waarbij efficiëntie- en effectiviteitsverbeteringen de belangrijkste doelstellingen zijn.

Aangezien het storingsgedrag van installatiedelen door verscheidene aspecten wordt beïnvloed, moeten de analyses door een multi-disciplinaire groep worden gescheiden. Naast de Technische Dienst dienen ook de Productie- en de Kwaliteitsafdeling vertegenwoordigd te zijn. Zaken als installatie performance worden vaak op tactisch management niveau aangepakt. In veel gevallen is er op dit niveau juist weinig overleg tussen de verschillende afdelingen. Op strategisch niveau vindt vaak voldoende overleg plaats tijdens de afstemming van plannen en op operationeel niveau vindt eigenlijk automatisch overleg plaats tijdens bijvoorbeeld storingen via de Chef van de Wacht. Op tactisch niveau kan men echter vrijwel onafhankelijk werken en dit gebeurt dan ook veelvuldig.

Om over te kunnen gaan van een afdelingsgericht naar een installatieresultaat gericht denken, is een van de bovengenoemde multi-disciplinaire, projectmatige aanpak uiterst geschikt. De selectie van subsystemen dient dan wel in onderling overleg tussen de betrokken afdelingen te geschieden.

– *Voorwaarden met betrekking tot het werkstroombeheersingssysteem*

Met behulp van de procedure zal de hoeveelheid preventief onderhoud waarschijnlijk toenemen. Het beheersingssysteem dat de periodieke werkopdrachten genereert zal geschikt moeten zijn voor de invoering van preventief onderhoud. Een veel voorkomend probleem is, dat er geen koppeling bestaat tussen het storingsmeld- en het beheersingssysteem. Hierdoor loopt men het risico een bepaald installatiedeel gepland preventief te vervangen of te inspecteren terwijl het kort tevoren al correctief is gewisseld, zodat het normale interval van de preventieve activiteit nog niet is verstreken. Als een installatiedeel correctief wordt verwisseld, dient het beheersingssysteem de geplande preventieve activiteit op te schuiven, zodat een onnodig snelle vervanging of inspectie wordt voorkomen.

– *Voorwaarden met betrekking tot de performance meting*

In produktieomgevingen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van 'kengetallen' om de prestatie van installaties of afdelingen te meten. Er zijn dan ook talloze kengetallen ontwikkeld en beschreven.

Een kengetal dient alle capaciteitsverliezen – en de onderlinge samenhang ertussen – in kaart te brengen. Het kengetal dat hier aan voldoet is de 'Algehele Systeem Effectiviteit' welke is afgeleid van Nakajima⁷.

In het algemeen kunnen we de volgende categorieën ls verliesposten onderscheiden met betrekking tot de potentiële capaciteit van een technisch systeem.

A. Geplande stilstanden voor:

- logistieke of produktieaspecten
- preventief onderhoud

B. Ongeplande stilstanden wegens:

- logistieke factoren (instellen, omstellen)
- correctief onderhoud

C. Gereduceerde baansnelheden wegens:

- opstarten na omstellen
- slechte baanconditie of opstarten na storing of preventieve onderhoudsstilstand

D. Afkeur (declassificaties) wegens:

- produktie- of handlingsfouten
- baanconditie of storingsen.

De overcapaciteit en eventuele stilstand wegens vakantie wordt van de kalendertijd afgetrokken en wordt niet meegerekend als verlies. De eerste posten zijn steeds produktieverliezen en de tweede categorie zijn verliezen, die zijn veroorzaakt door aan onderhoud gerelateerde zaken. Het capaciteitsverlies dat wordt veroorzaakt door de bovengenoemde posten wordt (in Tabel 2) in beeld gebracht.

Hierbij bevinden de verliesposten zich in de tijden. Dat wil zeggen dat in de kalendertijd een stukje geplande logistieke of produktiestilstand zit (post A1). De Kalendertijd minus de post A1 is gelijk aan de Geplande Bedrijfstijd.

Tabel 2. Opbouw van de effectieve produktietijd

Kalendertijd								A1
Geplande bedrijfstijd							A2	
Bruto geplande produktietijd						B1		
Netto geplande produktietijd					B2			
Bruto echte produktietijd (draaitijd)				C1				
Normtijd produktpakket			C2					
Bruto effectieve produktietijd		D1						
Netto effectieve produktietijd	D2							
Verrekende effectieve tijd								

Aan de bovengenoemde opbouw (Tabel 2) kunnen deel-kengetallen worden gekoppeld. Als we bijvoorbeeld de percentuele grootte van post A1 willen bepalen delen we de Geplande Bedrijfstijd door de Kalendertijd. Als we deze fractie van 1 aftrekken, krijgen we het percentage van de tijd dat de installatie stilstond voor de post A1.

Dit kunnen we voor alle verliesposten doen.

Als we alle fracties met elkaar vermenigvuldigen krijgen we de *Algehele Systeem Effectiviteit*, welke gelijk is aan het quotiënt van de Verrekende Effectieve Tijd en de Kalendertijd (minus de overcapaciteit).

De performance van de installatie kan met één kengetal worden gevolgd, terwijl men bij het kijken naar de afzonderlijke fracties, de grootte van de afzonderlijke verliesposten in kaart brengt.

Het inzicht in de grootte van de afzonderlijke verliesposten is nodig om te bepalen waar de grootste ‘effort’ in moet worden gestoken. Aan de hand van de verhoudingen tussen de verliesposten kan men de selectieparameters van de procedure bepalen.

Daar dit kengetal alleen de effectiviteit van de installaties meet, zal men op een hoger management niveau tevens de efficiëntie moeten meten, bijvoorbeeld met de ‘Performance Rate’⁸ Deze bestaat kort samengevat uit het produkt van de effectiviteit en de efficiëntie.

5. Conclusie

- De bovengenoemde procedure is aan het einde van het onderzoek getest en bleek bruikbaar.
- Alleen al met de aanpassing van de onderhoudsregel van een bepaald subsysteem werd een reductie in de betrokken IOK geschat van 30 %
- De procedures en de ontwikkelde voorwaarden vormen de eerste stap naar het optimaliseren van de integrale onderhoudsafhankelijke kosten en het cijfermatig ondersteunen van beslissingen omtrent investeringen voor bijvoorbeeld modificaties (Decision Support System).
- Naast de procedures bleken de voorwaarden betrekkelijk eenvoudig te kunnen worden ontwikkeld.

Het geheel van procedures en voorwaarden wordt momenteel verder ontwikkeld en geïmplementeerd.

Literatuur

1. S. Breure, *Een onderzoek naar de procedures en voorwaarden om de integrale onderhoudsafhankelijke kosten te kunnen verlagen*, Afstudeerrapport TUE van de Faculteit Technische Bedrijfskunde, december 1990.
2. Dr.ir. C.W. Gits, *Het ontwerpen van het onderhoudsconcept een kader*, D3010, Onderhoudsmanagement, Samsom, NIVE.
5. A.H. Christer and W.M. Waller, *Delay time mode of industrial inspection maintenance problems*, Journal of Operational Research Society, vol. 34, 1984, Great-Britain.
6. Dr.ir. J.H.J. Geurts, *Grafische methoden*, D5010, Onderhoudsmanagement, Samsom, Nive.
7. Seiichi Nakajima, *Introduction to TPM (Total Productive Maintenance)*, Productivity Press, Cambridge, USA, 1988.
8. Prof.ir. P.C.F. Bekker, Ph.D., *Ontwerpen/beheersen van technische produktiesystemen*, syllabus van de faculteit Technische Bedrijfskunde, TU Eindhoven, vakgroep Technische Produktiesystemen.

Onderhoudsbewust ontwerpen

30

*Dit artikel is afgeleid van het afstudeerrapport
van ir. M. Wouters
en samengevat en bewerkt door ing. E.J.L. Lamberti*

1. Inleiding en opdrachtformulering

– Inleiding

In het kader van een afstudeeropdracht is een onderzoek uitgevoerd bij een afdeling bedrijfsmechanisatie waarbij het volgende *probleem* wordt onderzocht: hoe kan tijdens het ontwerpen van een technisch systeem, onder afweging van eventuele extra investeringskosten, een bijdrage worden geleverd aan verlaging van de onderhoudskosten en stilstandstijden van produktielijnen in de glasfabrieken voor beeldbuisonderdelen.

Deze vraag komt voort uit de noodzaak om in de glasfabrieken meer te produceren en de kosten te verlagen.

Het belang van onderhoudskosten en stilstandskosten wordt duidelijk wanneer bijvoorbeeld kan worden weergegeven wat de invloed is van diverse parameters op de kostprijs van een lamp.

De belangrijkste parameters zijn daarbij onder meer:

- machinekosten
- onderhoudskosten
- arbeidskosten van bedienende operators
- stilstandskosten van de machine
- materiaalkosten van uitvalprodukten
- uitvalkosten.

Als de *stilstandskosten* met x procent kunnen worden verminderd, dan daalt de kostprijs met 5 x procent. Als de onderhoudskosten met x procent kunnen worden verminderd dan daalt de kostprijs ook met ongeveer x procent.

Deze resultaten zouden voor glazen beeldbuisonderdelen vergelijkbaar kunnen zijn omdat – evenals bij een lamp – ook hier sprake is van:

- hoge investeringkosten
- produktielijnen
- langdurige aanloopproblemen na onderbreking van het proces (glas!).

Onderhoudskosten en *machinestilstand* kunnen onder meer worden verlaagd door maatregelen tijdens het gebruiken van machines. Daartoe is al enige jaren in de fabriek een onderhoudsproject gaande. Dit omvat:

- het invoeren van preventief onderhoud
- verbeteren van de onderhoudsplanning
- verbeteren van de materiaalvoorziening (reserveonderdelen)
- verbeteren van de machinedocumentatie
- beter opleiden van onderhoudspersoneel
- opzetten van registratiesystemen voor analyse-doeleinden van onderhoudskosten, storingsgegevens, onderdelenverbruik etcetera.

De belangrijkste manier om verbeteringen met betrekking tot onderhoudskosten en stilstand te realiseren is echter, om er tijdens het *ontwerpen* van een technisch systeem al rekening mee te houden (figuur 1 illustreert dit⁷).

In deze figuur is aangegeven dat gemiddeld ongeveer 95% van de 'life cycle cost' (LCC) zijn bepaald, op het moment dat een systeem is ontworpen. De 'life cycle cost' zijn alle kosten, die optreden gedurende de totale gebruiksduur van een systeem (inclusief het aanschaffen en afstoten van het systeem).

– *Opdrachtformulering*

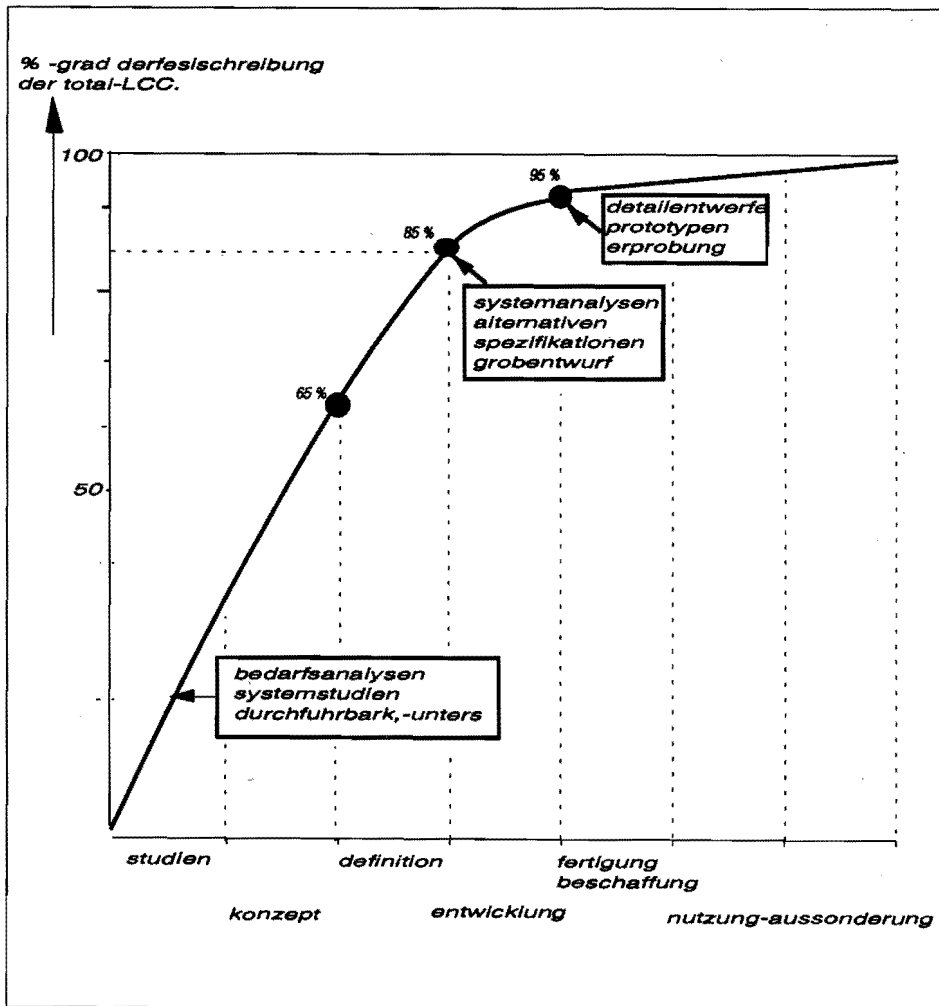
De 'voorlopige opdrachtformulering' voor dit afstudeeronderzoek luidde:

Geef aan hoe tijdens het ontwerpen van een technisch systeem op systematische wijze rekening kan worden gehouden met het onderhoud ervan.

Dit betreft een bedrijfskundig onderzoek. Het daadwerkelijk ontwerpen van een technisch systeem is een aangelegenheid van de betrokken technische disciplines en blijft hier dan ook buiten beschouwing. De bedoeling is om het resultaat van ontwerpen te beïnvloeden, om reeds in dat stadium een bijdrage te leveren aan lagere onderhoudskosten en minder stilstand van een produktielijn.

In voorgaande paragraaf is het probleem aangegeven, waar het onderzoek uit voortkomt. Dit probleem betreft de noodzaak om in de glasfabrieken meer te produceren en de kosten te verlagen. Een belangrijke mogelijkheid om dit te realiseren is:

- verlaging van de stilstand van produktielijnen en
- verlaging van de onderhoudskosten.



Figuur 1. Vastlegging van 'life cycle costs'

Door invoering van preventief onderhoud en het verbeteren van onderhoudsplanning, opleiding, documentatie, materiaalvoorziening (reserveonderdelen) enzovoort wordt in de fabrieken hieraan gewerkt. Behalve dergelijke maatregelen in de fabrieken, is het op langere termijn van belang om met betrekking tot onderhoud betere machines te ontwerpen.

Hieruit komt voort de voorlopige opdrachtformulering.

- Aanpak

Van een bepaald ontwerp van een technisch systeem worden de gevolgen onderzocht voor het betreffende onderhoudsconcept.

De invloed van het onderhoudsconcept op de onderhoudsbeheersing blijft buiten beschouwing. Ook wordt nauwelijks aandacht geschonken aan de overige facto-

ren die van invloed zijn op de onderhoudsbeheersing (zoals onderhoudscapaciteiten).

Gits⁵⁶ presenteert een framework om systematisch een onderhoudsconcept voor een technisch systeem op te stellen. Dit wordt het TUE-ontwerpkader voor een onderhoudsconcept genoemd (*zie ook de hoofdstukken 11 en 26 in dit boek, Red.*).

Hierin worden drie fasen onderscheiden:

- kwalificeren van onderhoudsregels
- kwantificeren van onderhoudsregels
- bepalen van het onderhoudsconcept.

In het TUE-onderhoudsmodel³ wordt het opstellen van het onderhoudsconcept aangegeven door vier blokken:

- fysische processen technisch systeem
- analyse storingsgedrag
- keuze onderhoudsregels
- onderhoudsconcept.

De eerste drie blokken komen overeen met de eerste fase van het ontwerpkader; het vierde blok van het onderhoudsmodel komt overeen met de tweede en derde fase van het ontwerpkader.

Het TUE-onderhoudsmodel beschrijft de relatie tussen het ontwerp van een technisch systeem en de onderhoudsbeheersing; de onderhoudsbeheersing wordt beïnvloed door de vraag naar onderhoud.

De vraag naar onderhoud van een technisch systeem wordt mede bepaald door het onderhoudsconcept; het onderhoudsconcept is mede gebaseerd op het ontwerp van een technisch systeem.

- *Definitieve opdrachtformulering*

Op basis van de uiteengezette aanpak en overwegingen, kan de definitieve opdracht worden geformuleerd:

Geef aan hoe in het ontwerpstadium van een technisch systeem de kwalitatieve fase van het onderhoudsconcept kan worden opgesteld, hoe een keuze kan worden gemaakt uit de verschillende mogelijke oplossingen voor een storing en hoe met deze informatie bij het ontwerpen van het systeem rekening kan worden gehouden.

Anders gezegd: in plaats van een onderhoudsconcept op te stellen, nadat een technisch systeem volledig is ontworpen, wordt het onderhoudsconcept (althans een deel) *tijdens* het ontwerpen opgesteld, om onderhoudsproblemen die hieruit volgen vroegtijdig in het ontwerpstadium al te onderkennen.

Deze opdracht wordt op de volgende wijze aangepakt:

- in de eerste plaats wordt aandacht besteed aan uniformiteit in terminologie, definities en bestaande inzichten met betrekking tot onderhoud
- daarna wordt een voorstel gepresenteerd hoe tijdens het ontwerpen de kwalitatieve fase van het onderhoudsconcept kan worden opgesteld. De essentie hiervan is dat afwegingen en keuzes die de constructeur impliciet maakt, expliciet en bespreekbaar worden gemaakt (hoofdstuk 2)
- de werkwijze wordt daarna (in hoofdstuk 3) uitgeprobeerd op een voorbeeld, om te onderzoeken of de werkwijze toepasbaar is en om deze te verduidelijken.
- tenslotte is vereist, dat aandacht wordt besteed aan de informatie die nodig is om de werkwijze beter te kunnen uitvoeren (*in dit artikel niet opgenomen, Red.*).

2. Werkwijze

- Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe tijdens het ontwerpen van een technisch systeem meer rekening kan worden gehouden met het onderhoud; in het hierop volgende hoofdstuk wordt het resultaat van een toepassing van deze werkwijze besproken.

De werkwijze is ontstaan door 'trial and error'. Op allerlei manieren is geëxperimenteerd en geprobeerd bedrijfskundige kennis en inzichten met betrekking tot onderhoud toe te passen. Het uiteindelijke resultaat is beschreven als een werkwijze, die echter zeker niet de enig mogelijke is, noch dat deze volledig is of een pasklaar 'recept'.

De essentie van de werkwijze is het bevorderen van *overleg*. Afwegingen en keuzes die de constructeur normaliter impliciet maakt 'in zijn achterhoofd', moeten expliciet en bespreekbaar worden gemaakt.

Het uitgangspunt is dat tijdens het ontwerpen wordt nagegaan welke storingen kunnen optreden. Vanzelfsprekend kan dit gedetailleerder en exacter, naarmate het ontwerpen vordert.

Voor al die storingen wordt geprobeerd een oplossing te vinden.

Onder een *oplossing* wordt verstaan:

- een onderhoudsactiviteit, waardoor een storing wordt voorkomen of waardoor het technisch systeem na een storing wordt gerepareerd, en/of
- een constructieve aanpassing, die een storing voorkomt en/of de gevolgen ervan beperkt en/of onderhoudsactiviteiten ondersteunt.

Een belangrijk element van de werkwijze is, dat de oorzaken van een storing alleen dan worden onderzocht, wanneer voor de storing als zodanig geen goede

oplossing door middel van onderhoud en/of aanpassing van het ontwerp kan worden gevonden. Dit wordt met een drietal voorbeelden toegelicht:

- Bijvoorbeeld een gloeilamp en een woonhuis. Voor dit onderdeel geldt SAO (storingsafhankelijk onderhoud).
Als de lamp kapot gaat, wordt hij weggegooid en vervangen door een nieuwe. Dit is een goede oplossing, want een gloeilamp is niet duur, gaat niet vaak kapot en de gevolgen van deze storing zijn beperkt (zeker als er reservelampen in voorraad zijn).
De *oorzaken* van de storing blijven dus volledig buiten beschouwing!
- Een tweede voorbeeld is een auto. Stel een bepaalde auto heeft om de 10.000 KM een grote onderhoudsbeurt nodig. De eigenaar brengt de auto 's morgens naar de garage, krijgt voor die dag een andere auto mee, en 's avonds haalt hij zijn eigen auto weer op. Voor deze eigenaar bestaat onderhoud dus alleen uit het laten uitvoeren van de onderhouds beurten. Wat er in de garage precies wordt gedaan weet hij niet of is voor hem niet belangrijk.
Iets dergelijks geldt voor revisie-deelsystemen in glasfabrieken. Een revisie-deelsysteem kent een eigen onderhoudscircuit en wordt daarom beschouwd als een apart technisch systeem met een eigen onderhoudsconcept.
Wanneer we een bepaalde machine ontwerpen en daarbij nadenken over storingen en onderhoud dan kunnen we in een aantal gevallen een deel van de machine beschouwen als een revisie-deelsysteem. Dat betekent dat er geen onderscheid wordt gemaakt naar de verschillende storingen van dat deelsysteem. Het deelsysteem wordt als geheel uigebouwd, na een storing of voor preventief onderhoud. In de werkplaats wordt dan het deelsysteem gerepareerd of er wordt een of andere onderhoudsbeurt uitgevoerd. Het revisie-deelsysteem kent zo een eigen onderhoudsconcept. De activiteiten in de werkplaats blijven verder buiten beschouwing.
- Een derde voorbeeld is een geleiding, die moet worden gesmeerd. Dit onderhoud wordt uitgevoerd om slijtage van de geleiding te beperken. De oorzaken hiervan hoeven niet te worden onderzocht om de onderhoudsactiviteit te kunnen vaststellen.

Samengevat: de oorzaken van een storing hoeven niet te worden onderzocht, als:

- het betreffende deelsysteem een wegwerp-deelsysteem is
- het betreffende deelsysteem een revisie-deelsysteem is
- het noodzakelijke onderhoud bekend is.

De werkwijze die in dit hoofdstuk wordt uitgewerkt, vereist zo wel technische als bedrijfskundige kennis en inzichten. Deze verhandeling is een bedrijfskundig afstudeerverslag en als zodanig blijft de uitwerking van technische vraagstukken grotendeels buiten beschouwing. Wel biedt de werkwijze een raamwerk dat duidelijk maakt welke technische kennis en inzichten vereist zijn. Verder geeft de

werkwijze richtingen aan voor vervolgonderzoek (zowel bedrijfskundig als technisch).

Voordat met de werkwijze kan worden begonnen, moeten de systeemgrenzen worden vastgesteld. Dat wil zeggen: er moet worden bepaald wat wel en wat niet hoort bij het technisch systeem, waarop de werkwijze wordt toegepast.

De werkwijze gaat bovendien ervan uit, dat er specificaties zijn ten aanzien van toegestane of gewenste onderhoudsregels. Deze specificaties spelen een rol bij de keuze van een onderhoudsregel.

De opbouw van dit hoofdstuk is verder 'in stappen' als volgt:

- In de volgende paragraaf wordt de eerste stap besproken; het opstellen van een storingsboom. Zo een *storingsboom* is een hiërarchische structuur, waarin van iedere storing is aangegeven, welke andere storingen de oorzaken en de gevolgen ervan zijn.

- In de daaropvolgende paragraaf worden voor de storingen in de storingsboom onderhoudsregels bepaald en/of constructieve oplossingen bedacht.

- De laatste paragraaf van dit hoofdstuk bespreekt combinaties van oplossingen; hoe voorkom je dat een combinatie van bepaald de oplossingen problemen geeft?

- *Opstellen storingsboom*

- *Inleiding*

Tussen storingen onderling bestaan *causale* relaties.

Een storing die een andere storing veroorzaakt is een *oorzaakstoring*; een storing die het gevolg is van een andere storing is een *gevolgstoring*.

De eerste stap in de werkwijze is het vaststellen van mogelijke storingen en de causale relaties ertussen. Zo wordt een hiërarchische storingsboom opgebouwd. Hiervoor is de constructeur verantwoordelijk. Het is zijn taak om een ontwerp te maken, dat de vereiste functie/prestatie vervult tijdens de totale gebruiksduur. Het doel van deze eerste stap is tweeledig:

- inzicht te krijgen in welke storingen uiteindelijk het gevolg zijn van alle overige storingen. Deze worden (zie later) de 'bovenste storingen' genoemd. Het belang hiervan wordt in de tweede stap duidelijk

- om de constructeur ertoe te bewegen grondig na te denken over mogelijke storingen in zijn ontwerp. Een groot deel van een technisch systeem wordt ontworpen door gebruik te maken van constructies en onderdelen die reeds eerder met meer of minder succes zijn toegepast. Kennis omtrent dergelijke verge-

lijkbare systemen maakt het mogelijk om al tijdens het ontwerpen storingen vast te stellen.

Een storingsboom is een hulpmiddel hierbij; het verkleint de kans dat storingen over het hoofd worden gezien.

Storingsonderzoek gaat over het vaststellen van storingen. In selectie van storingen wordt aangegeven dat niet *alle* bekende storingen hoeven worden opgenomen in de storingsboom. Tot slot wordt het resultaat beschreven van de eerste stap van de werkwijze.

– *Storingsonderzoek*

Het vaststellen van storingen is een technische aangelegenheid; er zal kort worden ingaan op enkele hulpmiddelen hiervoor.

– Voor het vaststellen van storingen is in de eerst plaats ervaring van belang. Op basis van intuïtie en ervaring kennen constructeurs veelal de zwakke punten en mogelijke storingen van hun eigen ontwerp. Hier wordt verder niet op ingegaan.

– Een goed inzicht in de functies, subfuncties, subsubfuncties etc. van een technisch systeem en een gedegen technische onderbouwing van de specificaties van deze functies zijn van groot belang om in een vroegtijdig ontwerp stadium storingen te kunnen omschrijven.

– Checklists kunnen een bijdrage leveren aan het opsporen van storingen.

– Onderzoek naar de invloed van omgevingscondities is belangrijk voor machines in glasfabrieken.

– Gericht technisch onderzoek naar oorzaken en gevolgen van een storing levert extra informatie op over mogelijke storingen.

– Storingsonderzoek wordt ondersteund door adequate informatievoorziening (*dit onderwerp komt in dit artikel niet aan de orde, Red.*). Het onderzoek naar mogelijke storingen wordt verder in dit verslag buiten beschouwing gelaten, omdat dit primair een zaak is van de technische disciplines.

– *Selectie van storingen*

Het zou niet efficiënt zijn om alle denkbare storingen in de storingsboom op te nemen:

– daarom wordt het belang van een mogelijke storing onderzocht;

– daarom worden bepaalde oorzaakstoringen buiten de storingsboom gelaten.

De eerste selectie bij het opstellen van de storingsboom is:

een storing wordt alleen in de storingsboom opgenomen, wanneer deze erg vaak optreedt en/of de gevolgen zeer ernstig zijn. Deze beslissing is gebaseerd op een subjectief oordeel van de constructeur.

Met betrekking tot de gevolgen wordt gelet op de volgende vier aspecten:

- veiligheid, milieu e. d.
- 'event' (d.w.z. het opteden van een storing wordt op zichzelf beschouwd, los van de gevolgen, bijzonder vervelend gevonden)
- onderhoudskosten
- stilstand.

In het TUE-onderhoudsmodel wordt het onderzoek naar de gevolgen van een bepaald ontwerp van een technisch systeem beperkt tot:

- de fysische processen van het technisch systeem
- analyse van het storingsgedrag
- keuze onderhoudsregels.

De gevolgen van een bepaalde storing voor de onderhoudskosten en vooral voor de stilstand van een produktielijn kunnen niet volledig worden overzien. Bedrijfskundig vervolgonderzoek naar deze verbanden lijkt dan ook nuttig.

Voorlopig kunnen de gevolgen van een storing met betrekking tot stilstand dus slechts bij benadering worden geschat. Daarbij kan in de betrokken glasfabrieken de volgende richtlijn worden gehanteerd (tenzij de situatie duidelijk anders ligt): Als een storing niet-uitstelbaar stilstandsonderhoud vergt, leidt dit tot produktieverlies.

Eerder is uiteengezet dat er drie situaties zijn, waarin de oorzaken van een storing niet hoeven te worden onderzocht. Wanneer een van deze situaties van toepassing is op een storing en de storingsboom, dan heeft het dus geen zin om de oorzaakstoringen van de betreffende storing op te nemen in de storingsboom. Immers, deze oorzaakstoringen zullen in elk geval buiten beschouwing blijven. Daarom wordt een tweede selectie toegepast bij het opstellen van de storingsboom: de oorzaakstoringen van een bepaalde storing worden alleen opgenomen in de storingsboom, wanneer op *het eerste gezicht*:

- de betreffende storing geen betrekking heeft op een wegwerp deelsysteem, én
- de betreffende storing geen betrekking heeft op een revisie deelsysteem, én
- het noodzakelijke onderhoud voor de storing nog onbekend is

'Op het eerste gezicht' betekent, dat in de eerste stap van de werkwijze globaal wordt bekeken of deze situaties van toepassing zijn. Pas in de tweede stap wordt nauwkeurig onderzocht. Een eventuele foute selectiebeslissing in de eerste stap wordt gecorrigeerd in de tweede stap.

- *Resultaat*

Het resultaat van de eerste stap van de werkwijze is een hiërarchische storingsboom (zie figuur 2).

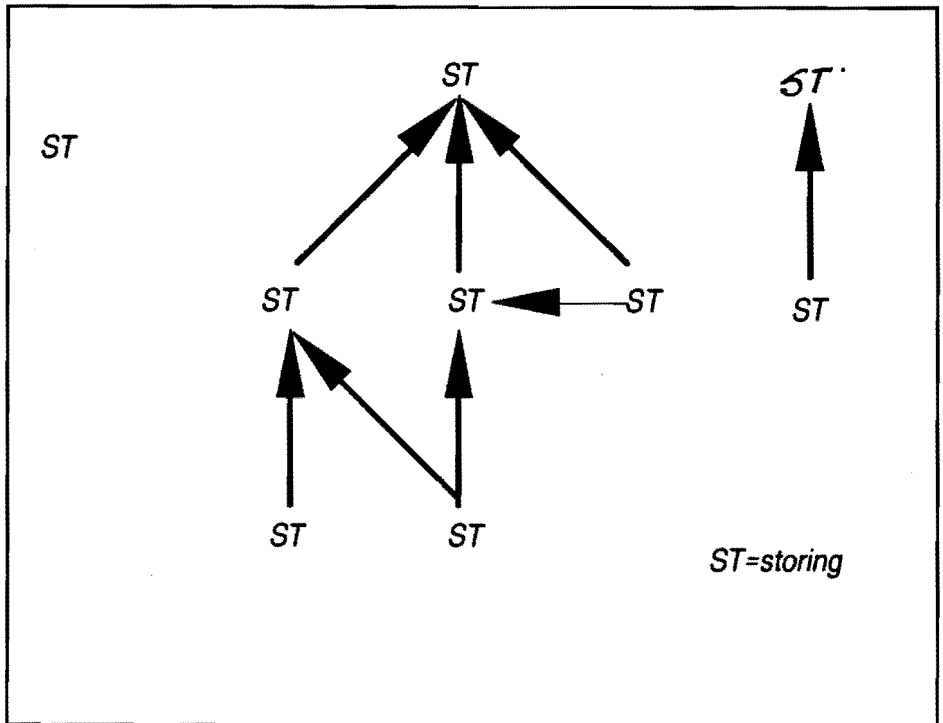
De *bovenste storingen* zijn de storingen die in de storingsboom geen andere storing tot gevolg hebben.

De oorzaakstoring van een storing staat onder die storing.

De gevolgstoring van een storing staat boven die storing.

Een storing kan meerdere storingen tot gevolg hebben en/of meerdere storingen als oorzaak.

De storingen hoeven niet allemaal met elkaar verbonden te zijn



Figuur 2. Voorbeeld van een storingsboom

Storingen kunnen zowel in functionele als technische termen worden omschreven. Veelal zullen de storingen bovenin de storingsboom functioneel zijn omschreven, de storingen onderin de boom overwegend technisch.

Naarmate het ontwerpen vordert zullen meer storingen, die aanvankelijk functioneel zijn omschreven, in technische termen worden beschreven.

De storingsboom kan tijdens het ontwerpen voortdurend worden aangepast:

- de detailleringgraad kan worden uitgebreid, als meer informatie beschikbaar komt
- de omschrijving van een storing kan worden aangepast aan de beschikbare informatie.

– *Bepalen van oplossingen voor storingen*

In de tweede stap worden oplossingen voor storingen bepaald. Een oplossing kan bestaan uit onderhoud, dus SAO, TAO of GAO. Ook zijn vaak constructieve oplossingen mogelijk, om een storing te voorkomen en/of de gevolgen ervan te beperken en/of onderhoud te vergemakkelijken of te verminderen.

Bijvoorbeeld door een constructieve verandering worden de gevolgen van een storing zozeer beperkt, dat volstaan kan worden met SAO, of inbouwen van een bepaalde meetmogelijkheid maakt TAO mogelijk.

Met behulp van de storingsboom wordt het onderstaande stroomschema (figuur 3) doorlopen. De storingen hebben een zogenoemde 'status', in verband met de logische beschrijving van het stroomschema; verder heeft deze 'status' geen betekenis.

We beginnen met de bovenste storingen, dus de storingen die geen andere storingen tot gevolg hebben. Als in de eerste stap van de werkwijze alleen een lijst van mogelijke storingen zou zijn opgesteld zonder deze in een storingsboom te rangschikken dan zou onduidelijk zijn wat de bovenste storingen zijn.

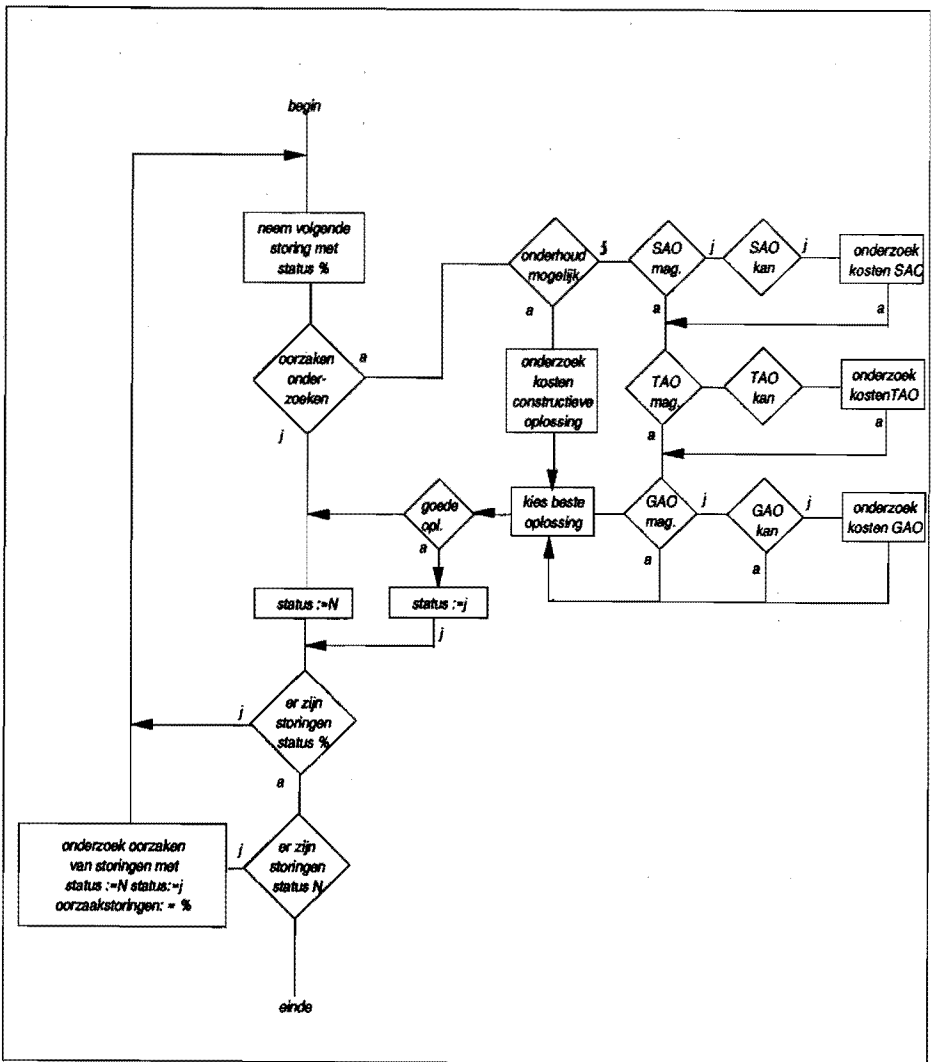
De bovenste storingen hebben in eerste instantie allemaal status Z. We nemen een storing met status Z.

De eerste keuzemogelijkheid is: of de oorzaken van deze storing al dan niet onderzocht moeten worden. Deze keuzemogelijkheid is gewenst, omdat het voor een aantal storingen bij voorbaat zinloos is om oplossingen te onderzoeken. In dat geval wordt de status van de storing N.

Wanneer de oorzaken niet meteen worden onderzocht, dan worden voor de onderhavige storing mogelijke oplossingen onderzocht. Allereerst wordt nagegaan of onderhoud mogelijk en wenselijk is. Bij veel storingen is dit evident. Vervangbaarheid kan hierbij een rol spelen. Wanneer onderhoud zou bestaan uit vervanging van een deel van het technisch systeem, dan dient dit een vervangbaar deelsysteem te betreffen dat is opgenomen in het assortiment reservedelen.

Voor iedere onderhoudsregel wordt nagegaan of deze is *toegestaan* in verband met de specificaties van de toegestane onderhoudsregels. Daarna wordt nagegaan of een bepaalde onderhoudsregel *toepasbaar* is. Voor SAO moeten de gevolgen van een storing aanvaardbaar zijn, GAO is alleen effectief bij een stijgende storingsgraad, TAO is alleen mogelijk wanneer een storingsvoorspellende grootheid bekend en meetbaar is.

Vervolgens worden de *kosten* van de toegestane en toepasbare onderhoudsregel(s) onderzocht. De kosten van SAO zijn hoger, naarmate de gevolgen van een storing ernstiger zijn en/of de storingsfrequentie hoger is.



Figuur 3. Stroomschema tweede stap werkwijze

De variantie van de storingskansdichtheid is sterk bepalend voor de kosten van GAO. De kosten van TAO worden bepaald door de kosten van de toestandsmeting en van eventuele constructieve aanpassingen om deze mogelijk te maken. Ook de nauwkeurigheid waarmee de storingsvoorspellende grootte het optreden van een storing voorspelt, heeft belangrijke invloed op de kosten van TAO.

Soms zal een onderhoudsregel worden gecombineerd met een constructieve wijziging van het ontwerp. In dat geval moeten de kosten van deze wijziging worden inbegrepen.

Veelal ontbreken de gegevens die nodig zijn om de kosten e.d. nauwkeurig te

berekenen. Er moet dan worden gewerkt met globale schattingen (vaak relatief 'hoeveel het is weet ik niet, maar dat is in ieder geval duurder dan dat').

Onderstaande Tabel 1 geeft lijsten die een hulpmiddel kunnen zijn om de kosten volledig te onderzoeken.

Tabel 1. Onderhoudskosten

1. STORINGSAFHANKELIJK ONDERHOUD (SAO)
omschrijving

- STORINGSKOSTEN
- gevolgschade
- stilstandskosten
- reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- STORINGSFREQUENTIE:

- INSPECTIEKOSTEN:
- stilstandskosten
- uitvoeringskosten

- INSPECTIEFREQUENTIE:

- INVESTERINGSKOSTEN:
- aanschaf
- reserveonderdelen
- vermogenskosten

1a. in combinatie met CONSTRUCTIEVE OPLOSSING

- omschrijving:

- STORINGSKOSTEN:
- gevolgschade
- stilstandskosten
- reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- STORINGSFREQUENTIE:

- INSPECTIEKOSTEN:
- stilstandskosten
- uitvoeringskosten

- INSPECTIEFREQUENTIE:

- INVESTERINGSKOSTEN:
- aanschaf
- reserveonderdelen
- vermogenskosten

2. TOESTANDSAFHANKELIJK ONDERHOUD (TAO)

- omschrijving:

- TAO-ONDERHOUDSKOSTEN
- stilstandskosten
- onderhoudskosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- ONDERHOUDSFRQUENTIE:

- METINGSKOSTEN:
- stilstandskosten
- uitvoeringskosten

- STORINGSKOSTEN: STORINGSFREQUENTIE:
- gevolgschade
- stilstandskosten
- reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- INVESTERINGSKOSTEN:
- aanschaf
- reserveonderdelen
- meetapparatuur
- vermogenskosten

2a. in combinatie met CONSTRUCTIEVE OPLOSSING omschrijving:

- TAO-ONDERHOUDSKOSTEN:
- stilstandskosten
- onderhoudskosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- ONDERHOUDSFREQUENTIE:

- METINGSKOSTEN:
- stilstandskosten
- uitvoeringskosten

- METINGSFREQUENTIE:

- STORINGSKOSTEN: STORINGSFREQUENTIE:
- gevolgschade
- stilstandskosten
- reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)
- terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)

- INVESTERINGSKOSTEN:
- aanschaf
- reserveonderdelen
- meetapparatuur
- vermogenskosten

3. GEBRUIKSAFHANKELIJK ONDERHOUD (GAO)

- Omschrijving:

- GAO-ONDERHOUDSKOSTEN:
- *stilstandskosten*
- *onderhoudskosten (loon, materiaal*, werkplaats)*
- *terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)*

- ONDERHOUDSFREQUENTIE:

- STORINGSKOSTEN: STORINGSFREQUENTIE:
- *gevolgschade*
- *stilstandskosten*
- *reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)*
- *terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)*

- INSPECTIEKOSTEN: INSPECTIEFREQUENTIE:
- *stilstandskosten*
- *uitvoeringskosten*

- INVESTERINGSKOSTEN:

- *aanschaf*
- *reserveonderdelen*
- *meetapparatuur*
- *vermogenskosten*

3a. in combinatie met CONSTRUCTIEVE OPLOSSING

- *omschrijving:*

- GAO-ONDERHOUDSKOSTEN:
- *stilstandskosten*
- *onderhoudskosten (loon, materiaal*, werkplaats)*
- *terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)*

- ONDERHOUDSFREQUENTIE:

- STORINGSKOSTEN: STORINGSFREQUENTIE:
- *gevolgschade*
- *stilstandskosten*
- *reparatiekosten (loon, materiaal*, werkplaats)*
- *terugbouwkosten (evt. stilstandskosten)*

- INSPECTIEKOSTEN: INSPECTIEFREQUENTIE:
- *stilstandskosten*
- *uitvoeringskosten*

- INVESTERINGSKOSTEN:

- *aanschaf*
- *reserve-onderdelen*
- *meetapparatuur*
- *vermogenskosten*

* LET OP ONDERSCHIED HERSTELLEN/VERVANGEN.

Speciale aandacht verdienen de kosten vanwege *stilstand*.

Stilstand veroorzaakt kosten, wanneer hierdoor productieverlies optreedt. Het is echter niet mogelijk om de gevolgen van een bepaalde onderhoudsactiviteit met betrekking tot productieverlies volledig te overzien. Voorlopig wordt uitgegaan van een zeer eenvoudig verband tussen onderhoud en productieverlies in de glas-fabrieken voor beeldbuisonderdelen.

Als het moment waarop onderhoud wordt uitgevoerd enigermate vrij gekozen kan worden, dan zal onderhoud worden uitgevoerd wanneer zich een geschikte gelegenheid voordoet, dat wil zeggen: wanneer er vanwege *andere* oorzaken lijnstilstand optreedt. In dat geval leidt deze onderhoudsactiviteit dus niet tot extra stilstand van de produktielijn en niet tot extra produktieverlies.

In overleg met de bedrijfsleiding glasfabriek is vastgesteld, dat in de onderhavige fabriek, het volgende onderhoud geen stilstandskosten veroorzaakt:

- elk preventief onderhoud
- elk onderhoud dat geen stilstandsonderhoud is (onderhoud tijdens bedrijf).

Correctief, nietuitstelbaar stilstandsonderhoud daarentegen veroorzaakt lijnstilstand. Het produktieverlies dat hierdoor ontstaat is onderdeel van de kosten van deze vorm van onderhoud.

Nadat de verschillende oplossingen zijn onderzocht, wordt de beste uitgekomen (dat wil zeggen: de oplossing die de minste totale kosten veroorzaakt, inclusief stilstandskosten).

Er wordt nagegaan of deze oplossing goed genoeg is. (Dat wil zeggen: als er bepaalde eisen worden gesteld aan oplossingen, dan moet een oplossing aan deze eisen voldoen. Op het moment zijn deze eisen nog niet gespecificeerd, zodat op basis van een subjectief oordeel wordt bepaald of een oplossing goed genoeg is). Als de oplossing goed genoeg is dan krijgt de storing de status J. Is dit niet het geval, dan wordt de status N.

Indien er nog storingen met status Z zijn, worden deze op de hierboven beschreven wijze onderzocht. Indien er geen storingen met status Z meer zijn, worden de oorzaakstoringen van storingen met status N bepaald. Deze oorzaakstoringen krijgen status Z. De storingen waarvan inderdaad de oorzaakstoringen bepaald kunnen worden, krijgen status J.

Tot zover de beschrijving van het stroomschema.

Nu blijkt waarom wordt begonnen met de bovenste storingen in de storingsboom:

In het algemeen worden de oorzaken van een storing alleen dan onderzocht, wanneer voor de storing als zodanig geen goede oplossing kan worden gevonden. De tweede stap begint daarom met de storingen die het uiteindelijke gevolg zijn van alle overige storingen. Er wordt dus begonnen met de bovenste storingen in de storingsboom (die zelf geen oorzaakstoring zijn, alleen gevolgstoring) en vandaar wordt er, indien nodig, verder in de storingsboom 'afgedaald'.

De beslissingen die in de werkwijze moeten worden genomen, kunnen op dit moment veelal slecht worden onderbouwd, omdat de benodigde technische kennis en/of informatie ontbreekt.

Er zijn dan ook vele interessante gebieden voor technisch vervolgonderzoek, bij-

voorbeeld nauwkeurige levensduurberekeningen voor GAO, toepasbaarheid van toestandsmetingen voor TAO, onderzoek naar de fatale grens en de waarschuwingsgrens bij TAO etc

Ook de bedrijfskunde kan d.m.v. informatievoorziening een bijdrage leveren aan betere onderbouwing van beslissingen.

– *Onderzoeken van combinaties van oplossingen*

– *Inleiding*

Het resultaat van de vorige (de tweede) stap van de werkwijze is dat voor iedere storing een onderhoudsactiviteit bekend is en/of een constructieve oplossing is bedacht. De laatste stap (de derde) is een onderzoek naar de samenhang van de oplossingen.

– *Combinaties van constructieve en onderhoudsoplossingen*

Het is mogelijk dat een aantal constructieve oplossingen samen moeilijk uitvoerbaar zijn. Bijvoorbeeld een machineframe is verstevigd om een bepaalde storing te voorkomen. Dit heeft tot gevolg dat hierdoor in bepaalde hoeken geen laklaag, die is bedoeld om een andere storing te voorkomen, kan worden aangebracht. In de derde stap van de werkwijze moet worden onderzocht of de constructieve oplossingen gezamenlijk toe te passen zijn. Dit is een technisch onderzoek.

Ook is het mogelijk dat een combinatie van een aantal constructieve- en een aantal onderhoudsoplossingen moeilijk is. Bijvoorbeeld als een extra stevige constructie snel in- en uitbouwen onmogelijk maakt.

In de derde stap van de werkwijze moet dus worden nagegaan of alle onderhoudsactiviteiten uitvoerbaar zijn. Ook dit is een technische aangelegenheid.

– *Combinaties van onderhoudsactiviteiten*

Onderhoudsactiviteiten zullen in de fabrieken in combinatie worden uitgevoerd. Meerdere activiteiten worden tot een pakket samengevoegd, het pakket wordt als geheel gepland en uitgevoerd. Hierdoor kunnen echter problemen ontstaan. Bijvoorbeeld als een bepaalde onderhoudsactiviteit een erg afwijkend onderhoudsinterval heeft, waardoor het moeilijk planbaar is, en moeilijk bij een pakket kan worden gevoegd.

Dergelijke problemen, die betrekking hebben op de tweede en derde fase van het TUE-ontwerpkader voor het onderhoudsconcept blijven nu echter buiten beschouwing.

3. Een toepassing

– *Inleiding*

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken van een toepassing van de werkwijze uit hoofdstuk 2. Als voorbeeld is de hydraulische feederpenaandrijving genomen. Voor een korte beschrijving van dit technisch systeem, zie volgende paragraaf.

De werkwijze is aan de hand van dit voorbeeld bedacht. Dit was een proces van 'trial and error'; mogelijkheden bedenken, deze proberen toe te passen, nadenken over problemen daarbij, enzovoort. Het resultaat is een werkwijze die bij dit voorbeeld goed uitvoerbaar is gebleken.

– *Korte beschrijving hydraulische feederpenaandrijving*

De feederpenaandrijving is een deelsysteem van de functie portievormen. De stroom glas die door de oven wordt geproduceerd moet met een bepaalde frequentie worden omgezet in glasporties van een bepaalde vorm en gewicht. Hiertoe zuigt de feederpen glas op in een buis en stoot dit uit. I.v.m. de noodzakelijke homogeniteit van het glas draait de buis. De schaar knipt de glasporties af onder de uitstroomopening.

De hydraulische aandrijving werkt met een elektronisch opgewekt signaal, dat via een stuurklep een bewegingspatroon aan de zuiger van een hydrocilinder oplegt. Zie figuur 4 voor het principe hiervan.

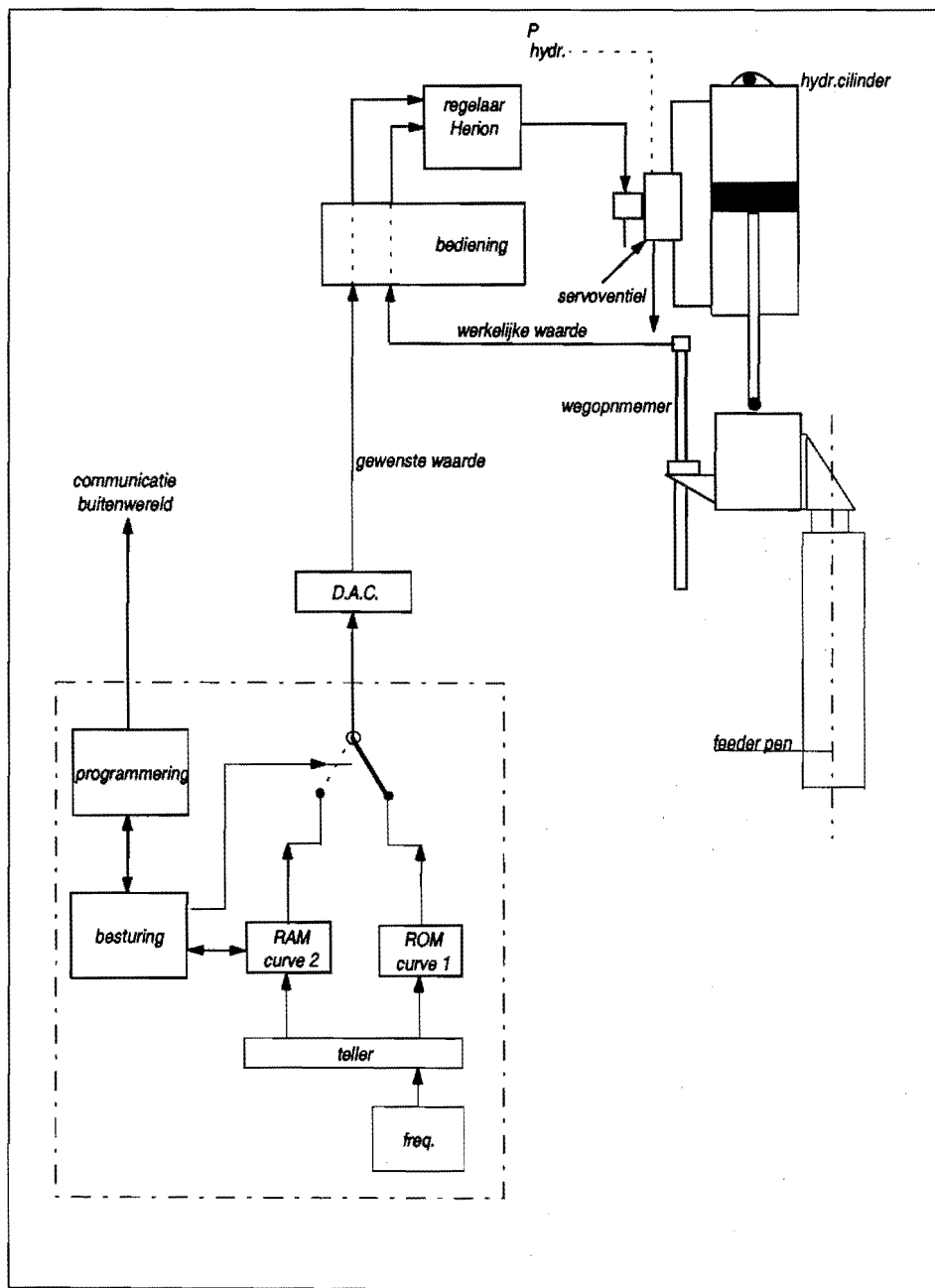
Bij de toepassing op dit voorbeeld zijn de systeemgrenzen als volgt vastgesteld:

- de feederpen en de feederpenhouder horen niet bij het technisch systeem
- de watergekoelde grondplaat hoort niet meer bij het beschouwde technisch systeem.

– *Specificatie van onderhoudsregels*

De volgende specificaties ten aanzien van de toegestane of de gewenste onderhoudsregels zijn bij dit voorbeeld gehanteerd. Er is van uitgegaan dat het systeem t.z.t. in de glasfabriek in volcontinu-bedrijf wordt gebruikt.

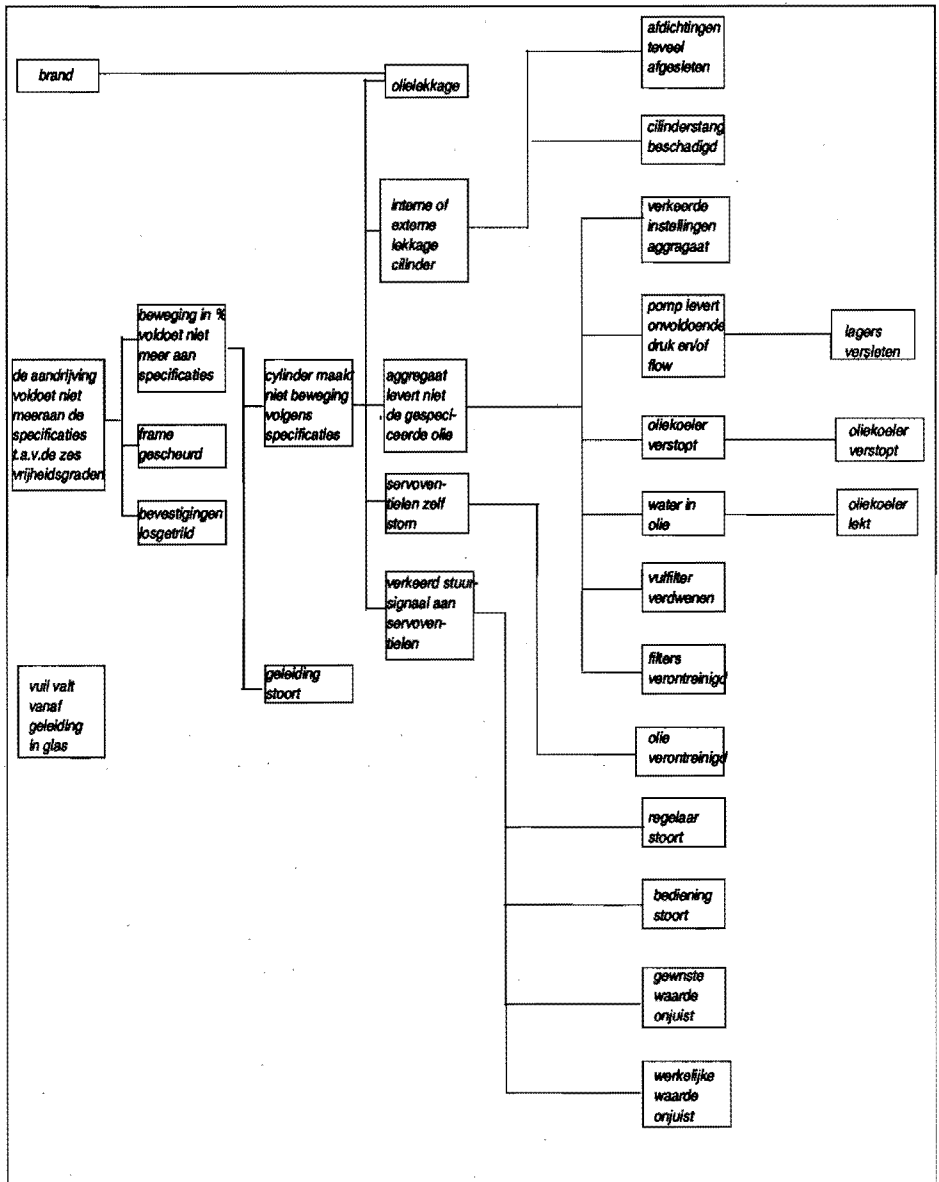
- probeer toepassing van SAO te vermijden of de gevolgen ervan te beperken, onder afweging van kosten en opbrengsten
- geen GAO, tenzij technisch of economisch niet anders mogelijk is
- bij TAO moet de noodzaak tot onderhoud (bedoeld wordt niet de toestandsmeting, maar herstellen of vervangen) minimaal een week van tevoren bekend zijn.



Figuur 4. Besturingsprincipe hydraulische feederpenaandrijving

– Storingsboom (de eerste stap)

Figuur 5 is de storingsboom, zoals opgesteld voor de hydraulische feederpenaandrijving. Het opstellen van deze storingsboom bleek weinig tijd te kosten; na overleg met de constructeur en anderen over het systeem en wat er mis kan gaan, is de storings boom in minder dan een uur opgesteld. Dit is een belangrijke reden om te verwachten dat de werkwijze ook op andere ontwerpen van de afdeling bedrijfsmechanisatie praktisch en snel toe pasbaar zal zijn.



Figuur 5. Storingsboom hydraulische feederpenaandrijving

Hieronder zijn een aantal deelfuncties van het systeem in onderlinge samenhang weergegeven. Deze functionele decompositie was een hulpmiddel bij het opstellen van het storingsnetwerk.

HYDRAULISCHE FEEDERPENAANDRIJVING
aandrijven feederpenhouder

<i>HYDRAULISCH SYSTEEM</i> <i>omzetten stuursignaal in</i>	<i>MECHANISCH SYSTEEM</i> <i>overbrengen van een beweging</i>	<i>ELECTRONISCH SYSTEEM</i> <i>besturen van een kracht</i>
<i>AGGREGAAT</i> <i>leveren van olie (met bepaalde drukflow, reinheid en temperatuur)</i>	<i>XY-VERSTELMECHANISME</i> <i>mogelijk maken van xy-verstelling</i>	<i>REGELAAR</i> <i>genereren stuursignaal uit bewegingssignaal en uit meet-signaal</i>
<i>LEIDINGWERK</i> <i>transporteren van olie</i>	<i>OPHANGING CYLINDER</i> <i>bevestigen cylinder van frame</i>	<i>BEDIENING</i> <i>beïnvloeden bewegingssignaal</i>
<i>SERVOVENTIELEN</i> <i>sturen van de oliestroom nisme in onderste stand</i>	<i>AANSLAG</i> <i>tegenhouden geleidingsmecha</i>	<i>TEMPOSONIC</i> <i>leveren meetsignaal</i>
<i>CYLINDER</i> <i>omzetten oliedruk in kracht</i>	<i>FRAME</i> <i>genereren bewegingssignaal</i>	<i>CURVE GEHEUGEN</i>
	<i>GELEIDING</i> <i>geleiden van de beweging</i>	
	<i>KOPPELING FEEDERPENHOUDER</i> <i>koppelen feederpenhouder aan aandrijving</i>	

Overzicht deelfuncties hydraulische feederpenaandrijving

– Oplossingen voor storingen (de tweedestap)

In deze paragraaf worden oplossingen bedacht voor de storingen in de boom. De uitwerking van constructieve oplossingen is een technische zaak, die in dit verslag buiten beschouwing blijft.

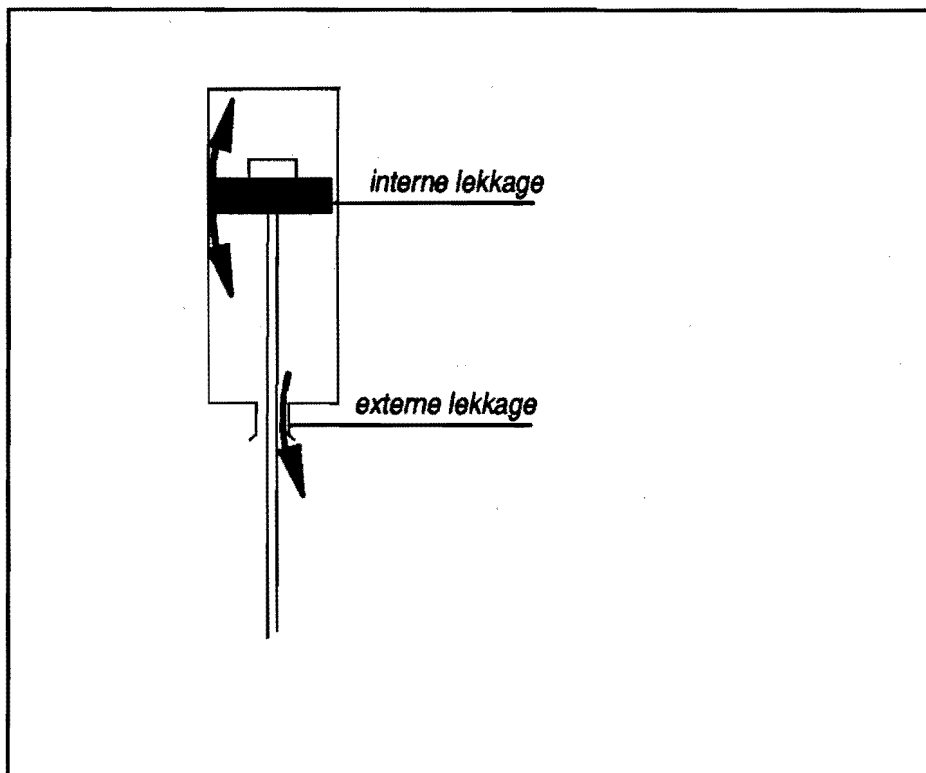
Van de 29 in figuur 5 opgesomde storingen was het resultaat van het doorlopen van het beslissingsdiagram in 12 gevallen: onderzoek oorzaken.

Van de overblijvende 17 storingen werd voor 4 een louter constructieve oplossing voorgesteld en voor 2 een constructieve oplossing in combinatie met een voorgestelde onderhoudsregel. Voor 11 storingen werd een oplossing door het toepassen van een onderhoudsregel (SAO, TAO of GAO) voorgesteld.

Bij wijze van voorbeeld:

De oplossing voor storing 14, 'afdichting te veel opgesleten' luidt als volgt: GAO ongewenst en levensduur onbekend, SAO onaanvaardbaar in verband met

reparatietijdsduur, constructieve oplossing niet mogelijk. Daarom wordt TAO toegepast. Er wordt een meetmogelijkheid voor externe olie lekkage ingebouwd, driemaandelijks wordt deze lekkage gemeten. De grenswaarde voor onderhoud is nog onbekend, daarom SAO totdat meer bekend is voor toepassing van TAO (zie figuur 6).



Figuur 6. Olielekkage van een cilinder

De geleidingen in de cilinder zijn van hetzelfde materiaal als de externe geleidingen. De toestandsmeting meet de externe lekkage. Als de externe geleidingen worden vervangen, worden eveneens de geleidingen in de cilinder vervangen. Dit onderhoud wordt uitgevoerd in de werkplaats.

– *Combinaties van oplossingen (de derde stap)*

De constructieve oplossingen zijn gezamenlijk uitvoerbaar. De onderhoudsactiviteiten verhinderen de constructieve oplossingen niet. Het combineren van onderhoudsactiviteiten kan buiten beschouwing blijven.

– Slotopmerkingen

De werkwijze uit hoofdstuk 2 bleek praktisch en redelijk snel toepasbaar op het voorbeeld in dit hoofdstuk. Verwacht wordt dat dit ook zal lukken bij andere ontwerpen. Bij toepassing van de werkwijze bleek dat veelal de ervaring en intuïtie van de constructeur toereikend zijn om de ernst van de storingen te schatten en om oplossingen voor storingen te bedenken. Wanneer dit echter niet het geval was, bleek vrijwel geen aanvullende informatie beschikbaar, zodat beslissingen niet of nauwelijks worden onderbouwd. Dit is bijvoorbeeld duidelijk voor de storing ‘afdichtingen teveel afgesleten’.

- Er is nog onbekend welke hoeveelheid interne en externe lekkage toelaatbaar is, voordat er sprake is van een storing.
- De cilinder in de hydraulische feederpenaandrijving is uniek voor dit systeem. Het huidige bestandsprogramma in de automatie waarmee de onderhoudsconcepten zijn opgeslagen, biedt geen enkele ondersteuning om de onderhoudsactiviteiten van een vergelijkbare cilinder op te zoeken.
- Bovendien is er geen schriftelijke informatie over de ervaring van een aantal jaren, die is opgedaan met de hydraulische aandrijving.

4. Conclusies en aanbevelingen

– Conclusies

- Tijdens het ontwerpen van een technisch systeem moet een bijdrage worden geleverd aan verlaging van de
 - onderhoudskosten en
 - stilstandstijdenvan produktielijnen in de glasfabrieken. Het is niet mogelijk gebleken om het effect op deze beide grootheden van een bepaalde ontwerpvariant van een technisch systeem volledig te overzien. Dit is voor een deel te verklaren met behulp van het TUE-onderhoudsmodel.

- De genoemde probleemstelling vereist:
 - bedrijfskundige kennis en inzichten m.b.t. onderhoud.

Het bleek mogelijk een werkwijze te ontwikkelen, waarin deze kennis en inzichten worden toegepast. Deze werkwijze behelst dat de constructeur systematisch nagaat welke storingen in zijn ontwerp kunnen optreden. Voor deze storingen moeten onderhoudsactiviteiten worden bepaald en/of het ontwerp moet worden aangepast (om een storing te voorkomen en/of om de gevolgen ervan te beperken en/of om bepaalde onderhoudsactiviteiten mogelijk te maken of te vergemakkelijken).

Deze werkwijze is gebaseerd op het *TUE-ontwerpkader voor een onderhoudsconcept*, aangevuld met een extra beïnvloedingsmogelijkheid: het ontwerp van het betreffende technisch systeem.

De essentie van deze werkwijze is dat afwegingen en keuzes, die de constructeur normaliter impliciet maakt, expliciet en bespreekbaar worden gemaakt. De werkwijze moet dan ook worden gezien als een hulpmiddel om overleg te bevorderen. Het is geen 'recept' dat probleemloos kan worden toegepast.

- technische kennis met betrekking tot onderhoud.

Dit aspect blijft in een bedrijfskundig afstudeerverslag ech ter buiten beschouwing.

- informatie over het functioneren van technische systemen.

Het bleek mogelijk om een aantal maatregelen voor te stellen, waarmee de informatievoorziening voor constructeurs bij de bedrijfsmechanisatie kan worden verbeterd.

- De genoemde werkwijze bleek snel toepasbaar op een voorbeeld de hydraulische feederpenaandrijving. Verwacht wordt dat dit ook zal blijken te lukken met andere ontwerpen.

- Voor het voorbeeld bleek echter de huidige informatie bij de afdeling bedrijfsmechanisatie ontoereikend om beslissingen te helpen onderbouwen.

- *Aanbevelingen*

- Er is technisch vervolgonderzoek gewenst naar verbeteringsmogelijkheden in verband met de volgende onderwerpen:

- In het ontwerpstadium van een technisch systeem moet beter worden voorspeld, welke storingen tijdens het gebruik kunnen optreden.
- Functionele specificaties moeten zo compleet mogelijk worden opgesteld bij de BM. Dit ondersteunt het bepalen van mogelijke storingen.
- Voor toepassing van GAO moeten levensduurberekeningen worden gemaakt.
- De toepassing van TAO moet worden uitgebreid. De mogelijkheden hiertoe moeten worden onderzocht.

- Volgens de aanpak in dit verslag wordt *tijdens* het ontwerpen van een technisch systeem de eerste fase van het TUE-ontwerpkader van een onderhoudsconcept in beschouwing genomen (de kwalitatieve fase). Er is een vervolgonderzoek nodig naar de mogelijkheden om tijdens het ontwerpen van een technisch systeem ook de tweede en derde fase reeds in beschouwing te nemen.

- Het lijkt gewenst dat bij de BM een persoon de taak krijgt om de resultaten

van dit onderzoek verder in te voeren en vervolgonderzoek te leiden (en zelf uit te voeren).

– Door de volgende maatregel wordt de informatievoorziening voor constructeurs bij de centrale BM-TV verbeterd:

- er moet een compleet en actueel set kopieën van de onderhoudsconcepten aanwezig zijn
- onderhoudsrelevante wijzigingsvoorstellen van machines in de fabrieken moeten zo snel mogelijk aan constructeurs bij de BM worden doorgegeven
- bij de keuze van een software-pakket moet rekening worden gehouden met eisen (m.b.t. de raadpleegfuncties), die worden gesteld aan het bestandsprogramma voor opslag van onderhoudsconcepten.

Literatuur

1. W.J.M. Geraerds en C. van der Enden, *Lexicon onderhoudstermen*, Handboek onderhoudsmanagement, Samsom Uitgeverij Alphen aan den Rijn-Brussel
2. W.J.M. Geraerds, *Het principe van toestandsafhankelijk onderhoud*, Symposium Euromaintenance, 13-15 oktober 1981, Eurofinish / VOM, Amsterdam
3. W.J.M. Geraerds, *Het TUE-onderhoudsmodel*, Handboek onderhoudsmanagement, Samsom Uitgeverij, Alphen aan den Rijn-Brussel, september 1987
4. H.J. Geurts, *Optimal age replacement versus condition based replacement; some theoretical and practical considerations*, Journal of Quality Technology, september 1983
5. C.W. Gits, *Een ontwerpkader voor het onderhoudsconcept*, Handboek onderhoudsmanagement, Samsom Uitgeverij, Alphen aan den Rijn - Brussel, september 1987
6. C. W. Gits, *The maintenance concept for a technical system, a framework for design*, Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 1984
7. K. Lewandowski, *Instandhaltungsgerechte Konstruktion*, Verlag TÜV, Rheinland, Köln. 1985
8. J. F. M. Maas, *Het methodisch ontwerpen van een onderhoudsconcept*, Afstudeerrapport Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bedrijfskunde, september 1986.