

Onderhoud en faalgedrag van technische systemen : ontwerp en toepassing van een simulatiemodel

Citation for published version (APA):

Both, H. (1989). *Onderhoud en faalgedrag van technische systemen : ontwerp en toepassing van een simulatiemodel*. [Dissertatie 1 (Onderzoek TU/e / Promotie TU/e), Mechanical Engineering]. Technische Universiteit Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR307720>

DOI:

[10.6100/IR307720](https://doi.org/10.6100/IR307720)

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1989

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 FAALGEDRAG
VAN
TECHNISCHE SYSTEMEN**

**ONTWERP EN TOEPASSING VAN EEN
SIMULATIEMODEL**

HENDRIK BOTH

**ONDERHOUD EN FAALGEDRAG
VAN TECHNISCHE SYSTEMEN**

**MAINTENANCE AND FAILURE BEHAVIOUR
OF TECHNICAL SYSTEMS**

ONDERHOUD EN FAALGEDRAG VAN TECHNISCHE SYSTEMEN

ONTWERP EN TOEPASSING VAN EEN SIMULATIEMODEL

PROEFSCHRIFT

**ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Eindhoven,
op gezag van de Rector Magnificus, prof. ir. M. Tels, voor een commissie aangewezen
door het college van dekanen in het openbaar te verdedigen op dinsdag 23 mei 1989
te 16.00 uur**

door

H. BOTH

geboren te Apeldoorn
werktuigkundig ingenieur

**Dit proefschrift is goedgekeurd door
de promotoren
prof. dr. ir. A.L. van der Mooren
en
prof. dr. P.C. Sander**

"...there is more isolation between the practitioners of maintenance and the researchers than in any other professional activity,..."

Malik, 1979.

*voor mijn ouders en onze dochters,
Elkie en Emy.*

SAMENVATTING

Modelvorming en kwantificering zijn essentiële fasen in de optimalisering van het ontwerpen het onderhoud van repareerbare, technische systemen. De probleemstelling in dit promotieonderzoek betreft het ontwerp en de toepassing van een kwantitatief model voor de beschrijving van het stochastische faal- en herstelgedrag van complexe systemen, met onderhoud als expliciete factor. Dit rekenmodel heeft bekendheid verworven onder de naam 'MAINSITHE'.

De beschrijving van het faalgedrag van technische systemen is traditioneel het terrein van de bedrijfszekerheidstechniek. De in dit vakgebied beschikbare analysemethoden zijn geëvalueerd in een literatuurstudie. Daarbij is beoordeeld in hoeverre met de verschillende methoden het effect van onderhoud als expliciete factor is of kan worden gemodelleerd. Hieruit is gebleken dat tot nu toe een kwantitatieve benadering die in voldoende mate bij de praktijk aansluit, slechts mogelijk is door simulatie.

Aan de introductie van het opgestelde model gaat een inventarisatie van de onderhoudsmethoden vooraf. In het bijzonder is aandacht geschonken aan de modellering van het stochastische faal- en herstelgedrag op component niveau. Voor enkelvoudige systemen worden de regels voor de keuze in kwalitatieve en kwantitatieve zin van de te volgen onderhouds-politiekten vermeld. Aangevoerd wordt dat deze regels slechts beperkt toepasbaar zijn op componenten in een samengesteld systeem, als gevolg van de afhankelijkheden tussen die componenten.

Met behulp van het ontworpen model kan het effect van een gedetailleerd onderhouds-concept gesimuleerd worden. Als rekenresultaten worden onder andere kengetallen voor component- en systeemgedrag, alsmede een gespecificeerd overzicht van de onderhouds-kosten gepresenteerd. Er wordt gerekend met zowel de onderhoudsuitvoerings- als de onderhoudsafhankelijke kosten.

Enkele mogelijkheden van het model worden geïllustreerd door toepassing op een aantal industriële systemen van uiteenlopende aard. Daarbij komen tevens de beschikbaarheid en de verwerking van de benodigde informatie aan de orde. Het model kan desgewenst ook een bijdrage leveren in de directe ondersteuning van de besluitvorming ten aanzien van uit te voeren incidenteel, groot onderhoud, zoals dat wordt uitgevoerd in een 'grote stop'.

De studie wordt besloten met een aantal conclusies, een aanzet tot voortgaand onderzoek en enkele suggesties voor de verdere ontwikkeling van MAINSITHE.

SUMMARY

Essential in the search for the optimal solution in designing and maintaining a technical, repairable system, are modelling and quantification. These are the central issues in this thesis, in which the design, construction and use of a quantitative (computer)model for the description of the stochastic failure and repair behaviour of complex systems are reviewed. Because of the importance of maintenance in the system behaviour, it is modelled as an explicit factor. The model developed is called MAINSITHE.

Traditionally the description of the failure behaviour of technical systems has been the field of the reliability technology. Current methods in reliability are evaluated and special attention is given to the extent to which each of these methods can include maintenance and its effect on the system behaviour. This evaluation leads to the conclusion that, if one intends to build a realistic model, a quantitative approximation can still only be achieved by simulation.

Before MAINSITHE is introduced, a review of some relevant aspects in today's maintenance is given. Next a limited introduction is presented to some of the distributions generally used for describing random variates such as the failure and repair characteristics on component level. Guidelines are given which lead to the best choice and quantification for a single component system. It is shown however that these guidelines are only of limited value if the components make up a complex system, due to their mutual dependencies. Application of the model allows us to evaluate in great detail the effect of a chosen maintenance concept on system behaviour. On the system level the program supplies (among others) figures for the MTBF, MTBM, MTTR and availability. Also total maintenance costs may be calculated, including costs of production losses etc. The value of the model is demonstrated by applying it to a number of different industrial cases. The model can also help in the selection of maintenance actions to be executed during a major stop of the system; a theoretical example is given. In every case the availability of the information needed proves to be important. The problems in gathering and analysing this information are briefly discussed.

In the conclusion of this thesis the main results are summarized, proposals for further study are presented, and suggestions for the future development of MAINSITHE are given.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	I
Summary	II
Inhoudsopgave	III
1: INTRODUCTIE.	1
1.1: Onderhoud als maatschappelijk verschijnsel.	1
1.2: Ontwikkeling van het onderhoudsvakgebied.	3
1.3: Ontwikkeling in het bedrijfsleven.	5
1.4: Doelstelling en inhoud.	7
2: PROBLEMATIEK, INVLOEDSFACTOREN EN AFBAKENING.	8
2.1: Terminologie.	9
2.2: Systeemindeling.	10
2.2.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.	12
2.3: Onderhoudspolitiek en onderhoudsconcept.	13
2.3.1: Elementaire onderhoudspolitieken.	13
2.3.2: Onderhoudsconcept.	14
2.3.3: Consequenties voor het onderhoudsmodel.	15
2.4: Modelling van het componentgedrag.	15
2.4.1: Begrippen uit de bedrijfszekerheidstechniek.	16
2.4.2: Gebruikelijke kansverdelingen.	19
2.4.3: Toepassing.	22
2.4.4: Consequenties voor het onderhoudsmodel.	24
2.5: Overige invloedsfactoren.	25
2.5.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.	26
2.6: Financiële aspecten.	26
2.6.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.	28
2.7: Conclusies.	28

3: ONDERHOUD EN SYSTEEMGEDRAG. Beschikbare rekenmethoden.	30
3.1: Analysemethoden, toepasbaar in de ontwerpfase.	31
3.2: Analytische methoden.	37
3.2.1: Basismodellen.	37
3.2.1.1: Het vernieuwingsproces en het Homogene Poisson Proces.	38
3.2.1.2: Het Inhomogene Poisson Proces.	42
3.2.2: Het gesuperponeerde vernieuwingsproces.	43
3.2.3: Markov ketens.	45
3.3: Simulatie.	46
3.4: Methoden gericht op onderhoudsmanagement.	47
3.5: Conclusies.	49
4: SIMULATIEMETHODE EN ONDERHOUDSMODEL.	51
4.1: Monte Carlo simulatie.	51
4.2: Simulatiemodel voor het systeemgedrag.	55
4.3: Nauwkeurigheid en aantal runs.	57
4.4: Systeemmodellering.	61
4.4.1: Systeemgrens en componentkeuze.	61
4.4.2: Materiële en functionele structuur.	62
4.4.3: Faal- en herstelgedrag.	65
4.5: Modellering van het onderhoudsconcept.	66
4.5.1: Gebruiksafhankelijk onderhoud.	66
4.5.2: Toestandsafhankelijk onderhoud.	69
4.6: Financieel model.	74
4.7: Presentatie MAINSITHE.	76
4.8: Validatie.	83
5: ONDERHOUDSCONCEPT, KEUZE EN KWANTIFICERING.	86
5.1: Keuze van de onderhoudspolitiek.	86
5.2: Gebruiksafhankelijk onderhoud voor enkelvoudige systemen.	88
5.3: Gebruiksafhankelijk onderhoud voor samengestelde systemen.	97
5.4: Illustratie.	101
5.4.1: Kwalitatieve en kwantitatieve modelbouw.	101
5.4.2: Storingsafhankelijk onderhoud.	103
5.4.3: Gepland gebruiksafhankelijk onderhoud.	105
5.4.4: Opportunistisch gebruiksafhankelijk onderhoud.	108
5.4.5: Toestandsafhankelijk onderhoud.	113

6: SIMULATIE, BENODIGDE INFORMATIE.	116
6.1: Externe informatiebronnen.	116
6.2: Interne informatiebronnen.	117
6.3: Analyse van de eigen gegevens.	121
6.4: Conclusie.	128
7: SIMULATIE, PRAKTIJKTOEPASSINGEN.	129
7.1: Tandwielkast.	130
7.2: Productielijn.	135
7.3: Dieselmotor voor tractiedoeleinden.	142
7.4: Conclusie.	150
8. INCIDENTEEL PREVENTIEF ONDERHOUD.	152
8.1: Niet stationair systeemgedrag, analytische mogelijkheden.	153
8.2: Niet stationair systeemgedrag, simulatie mogelijkheden.	158
9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.	164
6.1 Conclusies.	164
6.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek.	166
Appendix A: Afkortingen	168
Appendix B: Terminologie	169
Literatuur	172
Curriculum vitae	179
Nawoord	179

1 INTRODUCTIE

Paragraaf 1.1: Onderhoud als maatschappelijk verschijnsel.

De Nederlandse norm, NEN 10271 [1980], verwijst voor alle basisbenamingen, definities en aanverwante wiskunde op het gebied van de bedrijfszekerheid naar de IEC-publicatie 271, inclusief de aanvullingen A,B en C. Een officiële, Nederlandstalige definitie lijkt niet geformuleerd, maar volgens het lexicon in 'Onderhoudsmanagement', een uitgave van het NIVE, de Nederlandse Vereniging voor Management [1987], moet onder onderhoud van een technisch systeem worden verstaan:

"Alle activiteiten die ten doel hebben een technisch systeem in de technische staat te houden of terug te brengen, die nodig wordt geacht voor de door het systeem te vervullen functie".

Volgens een Engelstalige definitie, afkomstig van de IATA-WATOG, is onder onderhoud te verstaan:

"Those actions required for restoring or maintaining an item in servicable condition, including servicing, repair, modification, overhaul, inspection and determination of condition".

De Duitstalige definitie voor onderhoud, gegeven in DIN 31051 [1985] luidt:

"Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von technischen Mitteln eines Systems".

Het subtiële verschil in deze definities is te vinden in het al dan niet tot onderhoud behoren van eventuele modificaties binnen een systeem. Een dergelijke discrepantie is helaas nog kenmerkend voor het relatief jonge vakgebied, dat als eenheid tracht te opereren onder de naam terotechnologie. Deze term is afkomstig van het Grieks, τηρεω, hetgeen betekent: behoeden, bewaken, houden in bepaalde toestand. De term is om-

streeks 1970 gelanceerd in het Verenigd Koninkrijk, als startschot voor een campagne waarin aandacht gevraagd werd voor onderhoud in de meest brede zin. Terotechnology is te definiëren als:

Een combinatie van bestuurlijke, financiële, technische en andere methodieken, toegepast op duurzame produktiemiddelen, met het doel minimale levensduurkosten te bereiken. De uitvoering betreft zowel het ontwerpen op bedrijfszekerheid en onderhoudbaarheid van technische systemen, als hun bouw, inbedrijfsname, onderhoud, wijziging en vervanging en tevens de terugkoppeling van ervaringen m.b.t. prestaties en kosten naar ontwerp en bedrijfsvoering. (The National Terotechnology Centre)

Zonder overdrijven kan worden gesteld dat onderhoud van toenemend nationaal (economisch) belang is. In Nederland werd, volgens de Vereniging ten behoeve van Technische en Onderhoudsdiensten (NVDO), gedurende het jaar 1978 ca. 13% van het nationaal inkomen besteed aan onderhoud (ca. Hfl. 33 mld.). In 1988 is met onderhoud naar schatting een bedrag van circa Hfl. 50 mld. gemoeid geweest.

Het belang van onderhoud komt eveneens tot uitdrukking in de ontwikkeling van de werkgelegenheid. Volgens onderzoek van Malmholt [1988] blijkt in een sterk geïndustrialiseerd land als Zweden, gedurende de periode 1971-1981 het totaal aantal medewerkers werkzaam in de productie, te zijn toegenomen met ca. 0.5%, terwijl het gemiddeld aantal mensen dat actief is in het onderhoud, steeg met iets meer dan 10 %, in de procesindustrie zelfs met 30-35 %. Deze cijfers benadrukken het toenemende belang van onderhoud als maatschappelijk verschijnsel.

Sinds de tweede helft van de zestiger jaren ondergaat onderhoud een herwaardering. Waar onderhoud voorheen werd beschouwd als een noodzakelijk kwaad, onstaat tegenwoordig meer en meer het besef dat onderhoud niet slechts gezien moet worden als kostenpost, maar ook als middel om een bron van inkomsten te behouden. Niet louter financiële overwegingen zijn verantwoordelijk voor de accentverlegging in de waardering voor onderhoud als vakgebied, maar ook andere oorzaken kunnen worden genoemd, zoals de gelimiteerde hoeveelheid grondstof en energie. Dit heeft geleid tot een maatschappelijke verschuiving van een wegwerp- naar een meer op conservering gerichte economie.

Toegenomen complexiteit en schaalvergroting van industriële productieprocessen hebben geleid tot een stijging van de materiële welvaart. Voor wie daar oog voor hebben zijn er echter dagelijks belangrijke negatieve neveneffecten te constateren.

Dezelfde welvaartstoename heeft ook tot gevolg dat de acceptatie van deze neveneffecten steeds minder wordt. Stringentere wettelijke veiligheidseisen, hogere kwaliteitseisen, etc. zijn hier weer een directe afgeleide van. Mede bepalend voor al deze factoren is onder andere het storingsvrij functioneren van technische systemen. Daarbij is het uitgevoerde onderhoud van doorslaggevende betekenis.

Paragraaf 1.2: Ontwikkeling van het onderhoudsvakgebied.

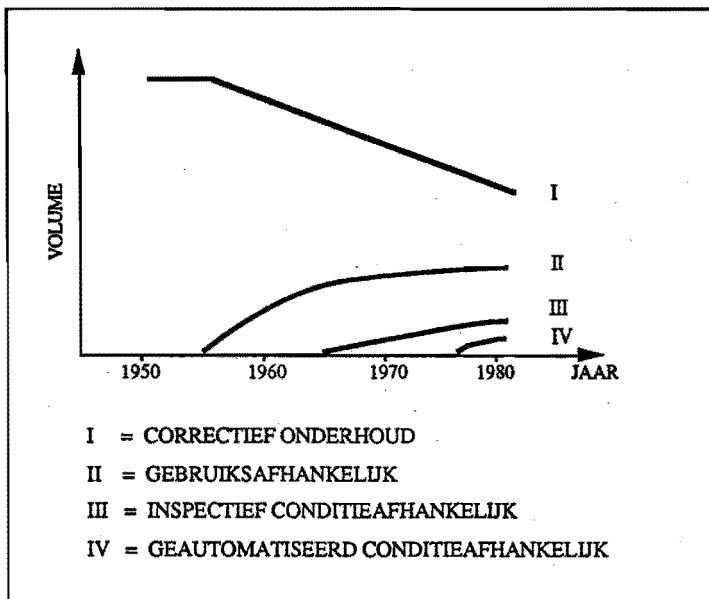
Het eerste gebruik van de probabilistische theorieën voor bedrijfszekerheidsvraagstukken is te traceren tot in de laatste jaren van de Tweede Wereldoorlog. Militairen werden geconfronteerd met een soms verbijsterend lage bedrijfszekerheid van hun steeds complexere wapen- en communicatiesystemen. Voor het merendeel betrof het aandachtsgebied toen nog de elektronische uitrusting.

Ook de daarop volgende impulsen voor de ontwikkeling van het vakgebied waren tot in de tweede helft van de jaren vijftig nog dikwijls afkomstig uit de militaire wereld. Maar door de versnelling van het Amerikaanse ruimtevaartprogramma in 1957, als reactie op de onverwachte lancering van de eerste Russische Sputnik, en door de opkomst van de kernenergiecentrales, volgde een uitbreiding naar de toepassing op mechanische systemen. Bedrijfszekerheidsanalyses als kwalitatief en kwantitatief hulpmiddel om bedrijfszekere en daarmee veilige systemen te ontwerpen kwamen in de belangstelling, ook voor de meer alledaagse industriële activiteiten en technische objecten. Binnen Nederland is halverwege de zeventiger jaren, althans op commerciële basis, het voortouw genomen door de KEMA (door Van Otterloo). Een schets van de historische achtergronden wordt gegeven door Barlow en Proschan [1965], een recente verhandeling over de bedrijfszekerheidstheorie en de toepassingen daarvan door Bergman [1985] en door Aven [1988].

Het aantal publicaties op bedrijfszekerheidsgebied is inmiddels enorm toegenomen, doch het overgrote deel van deze informatiestroom kent één duidelijke beperking. De gehanteerde bedrijfszekerheidsmodellen betreffen voor het overgrote deel niet-repareerbare systemen. Voor reparerbare systemen reikt de modellering van het systeemgedrag niet verder dan tot de eerste faalgebeurtenis. Als er al een poging gedaan wordt herstel te modelleren, dan wordt impliciet aangenomen dat een systeem, na reparatie, in zijn geheel als nieuw opgeleverd wordt, een in de praktijk vrijwel niet voorkomende situatie, zeker niet voor mechanische systemen. Gezien het feit dat veel duurzame systemen als reparerbare systemen worden ontworpen, is deze beperking uitermate onbevredigend.

Binnen de (mathematische) wereld van de bedrijfszekerheidstechniek is het belang van onderhoud lange tijd onvoldoende onderkend. De pas in 1983 (!) verschenen publicatie van Ascher en Feingold met als titel: 'Repairable systems: Reliability's stepchild', is illustratief voor deze ontwikkeling. In 1984 verscheen van hun hand het boek 'Repairable Systems Reliability', waarschijnlijk het eerste werk waarin op serieuze wijze wordt ingegaan op de problematiek die eigen is aan repareerbare systemen.

De oorsprong van de meer fundamentele aanpak van de onderhoudsproblematiek ligt ongetwijfeld in het bedrijfszekerheidsdenken. Maar de overstap van een bedrijfszekerheidsmodel voor repareerbare systemen naar een onderhoudsmodel brengt opnieuw een aantal moeilijkheden met zich mee, gezien het grote aantal invloedsfactoren en de grote diversiteit in de onderhoudspraktijk. Daarbinnen is in de laatste decennia de aandacht verschoven van uitsluitend effectief naar vooral ook efficiënt onderhoud. Voorheen werd gereageerd op het defect raken van een systeem: storingen moesten doeltreffend verholpen worden. Dat het efficiënter kan zijn storingen te voorkomen door preventief onderhoud is eerst later ingezien, zie figuur 1.1.



Figuur 1.1: Tendensen in de ontwikkeling van onderhoud (bron: Pekkarinen 1988).

Binnen het preventieve onderhoud zijn nog altijd verstrekkende ontwikkelingen gaande. Door bewaking en inspectie van een systeem wordt getracht preventief onderhoud niet meer (alleen) te laten afhangen van de reeds verrichte prestatie, maar veeleer van de feitelijke noodzaak ertoe. Deze noodzaak moet dan worden afgeleid uit al dan niet geautomatiseerde metingen aan de conditie van het systeem, waarbij de meest geavanceerde meet-, reken- en diagnostiechnieken worden ingezet.

De halverwege de jaren zestig aarzelend ingezette tendens om ook onderhoud door middel van een meer fundamentele aanpak te benaderen heeft nog altijd niet het stadium van volledige ontplooiing bereikt. De acceptatie van onderhoud als vakgebied is binnen de universiteiten en hogescholen, maar deels ook nog in het bedrijfsleven, verre van volledig. Dit blijkt bijvoorbeeld uit een publicatie uit 1985 van Wyles. Uit onderzoek verricht in een groot aantal verschillende bedrijven, kon worden opgemaakt dat nog altijd grote ontevredenheid bestaat bij het topmanagement over planning en uitvoering van het onderhoud. Ook volgens Lewandowski [1988] behoeft aansluiting van het onderwijs op de industriële behoefte nog veel bijstelling, tot op de hoogste niveau's.

Paragraaf 1.3: Ontwikkeling in het bedrijfsleven.

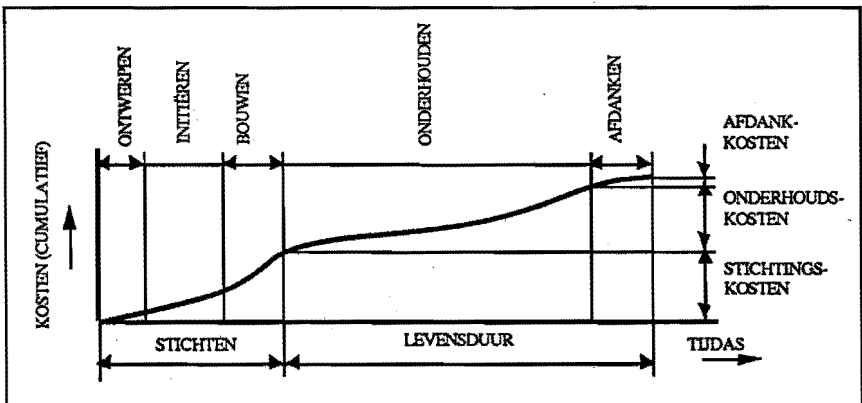
Ook binnen het bedrijfsleven is een ontwikkeling onderkenbaar, beïnvloed door het klimaat van beperkte groei en toenemende concurrentie. Meer en meer ontstaat het besef dat met de beslissing tot aanschaf van een installatie niet slechts de investering voor aankoop gemoeid is, maar dat na de oplevering van de installatie eveneens de onderhoudskosten gedurende de totale levensduur moeten worden opgebracht.

Voor duurzame objecten kunnen deze kosten een veelvoud zijn van de investeringskosten. In een bedrijfssituatie zijn per jaar de onderhoudskosten dikwijls van gelijke orde als de investerings- en afschrijvingskosten. Deze overweging ligt ten grondslag aan het 'Levensduurkosten'-concept, zoals dat genoemd wordt in de definitie van terotechnologie. Nieuw is dit idee niet; Gupta publiceerde in 1986 een artikel waarin 25 jaar gebruik van en ervaringen met een dergelijk concept worden geëvalueerd.

Levensduurkosten zijn opgebouwd uit stichtingskosten (o.a. ontwerp, fabricage en installatie), onderhoudskosten (o.a. verzorging en reparatie), gebruikskosten (o.a. bediening, grondstoffen en energie) en kosten voor het afdanken van het object, zie figuur 1.2. Een weloverwogen (investerings-)beslissing kan pas genomen worden als een inzicht bestaat in elk van de deelenkosten.

Als doel van een technisch object wordt in het algemeen beschouwd het produceren van goederen of diensten tegen minimale kostprijs per geleverde eenheid. Minimaliseren van de levensduurkosten is een enigszins naïeve doelstelling, want een dergelijke minimalisatie leidt pas dan tot een optimaal resultaat als de opbrengst, c.q. de productie als onafhankelijk van de (deel)kosten mag worden beschouwd. Dit is echter gewoonlijk niet het geval, omdat het uitgevoerde onderhoud directe invloed heeft op de beschikbaarheid van een systeem en daarmee op de productiecapaciteit en de opbrengst.

De veronderstelling dat voor een bestaand object het (optimaliseren van) het onderhoud gericht moet zijn op een zo hoog mogelijke beschikbaarheid van het systeem is eveneens onjuist. Hierdoor kan, soms ongemerkt, de situatie ontstaan dat de extra onderhoudskosten de extra opbrengsten overtreffen. Minimaliseren van de onderhoudskosten is alleen dan een juist uitgangspunt als rekening gehouden wordt met de invloed van het onderhoud op de beschikbaarheid van het systeem, ofwel de productiecapaciteit. Hiertoe dienen in de onderhoudskosten zowel de uitgaven direct verbonden aan het uitvoeren van de onderhoudsacties, de onderhoudsuitvoeringskosten O.U.K, als alle opbrengstverliezen kosten als gevolg van falen van het object en/of noodzakelijke onderhoudsacties gesommeerd te worden. Dergelijke onderhoudsafhankelijke kosten O.A.K, kunnen bijvoorbeeld veroorzaakt worden door productiederving of produktbederf, extra heffingen of boetes, etc. Met name de O.A.K. kunnen van geval tot geval zeer sterk verschillen. Als vuistregel wordt soms aangenomen dat deze tenminste zo hoog zijn als de O.U.K. In vele gevallen zijn juist de O.A.K. bepalend voor de keuze van het onderhoudsconcept.



Figuur 1.2: Totaal aan kosten gedurende de levensduur van een object (bron: Van der Mooren).

Paragraaf 1.4: Doelstelling en inhoud.

Optimaliseren vereist modellering en kwantificering. Zowel modellering als kwantificering van onderhoud en het effect ervan op systeemgedrag staan nog in de kinderschoenen. De probleemstelling in dit promotieonderzoek betreft het ontwerp en de toepassing van een kwantitatief model voor de beschrijving van het stochastische faal- en herstelgedrag van complexe systemen, met onderhoud als expliciete factor. Beoogd wordt daarmee een stuk gereedschap te ontwikkelen, dat in de bedrijfspraktijk bruikbaar is. Dit houdt onder meer in dat de kwantificering zich ook tot kostenaspecten moet uitstrekken.

Na de introductie in dit eerste hoofdstuk, wordt in hoofdstuk 2 het ontwerp kader aangegeven voor het onderhoudsmodel. De beschrijving van het faalgedrag van technische systemen is traditioneel het terrein van de bedrijfszekerheidstechniek. De beschikbare analysemethoden worden geëvalueerd in hoofdstuk 3. Daarbij is beoordeeld in hoeverre met de verschillende methoden het effect van onderhoud kan worden gemodelleerd; de geselecteerde methode, Monte Carlo simulatie, en het onderhoudsmodel worden toegelicht in hoofdstuk 4. De keuze en de kwantificering van de onderhoudspolitieken, bijeengevoegd in het onderhoudsconcept, zijn het onderwerp van hoofdstuk 5, dat ook voorziet in een eenvoudige illustratie van het onderhoudsmodel en de voorafgaande theorie.

Vervolgens worden in hoofdstuk 6 worden de voorwaarden besproken voor toepassing in de praktijk, waarbij de benodigde informatie en de informatieverwerking centraal staan. Vooral door de gedetailleerde opzet blijkt het onderhoudsmodel vele toepassingsmogelijkheden te hebben. Enkele praktijktoepassingen met betrekking tot het reguliere onderhoud, zoals dat in het onderhoudsconcept is verrat, volgen in hoofdstuk 7. Daarnaast kunnen de met het model verkregen resultaten gebruikt worden voor ondersteuning van de besluitvorming rond incidenteel, groot onderhoud, zoals in hoofdstuk 8 wordt aangetoond. Hoofdstuk 9 rondt het proefschrift af met conclusies en enkele aanbevelingen voor voortgezet onderzoek.

2 PROBLEMATIEK INVLOEDSFACTOREN EN AFBAKENING

Ter introductie van de terminologie worden in paragraaf 2.1 een aantal veelgehanterde begrippen geïntroduceerd. Modelleren van faalgedrag van systemen is oorspronkelijk het terrein van de bedrijfszekerheidstechniek, die daartoe verschillende modellen heeft ontwikkeld. Ter afbakening van het toepassingsbereik van het te ontwikkelen model is een indeling van de te modelleren systemen zinvol. Technische systemen kunnen worden onderverdeeld volgens verschillende criteria, bijvoorbeeld naar constructie, naar toegepaste onderhoudsmethodiek, of naar systeemgedrag, zie paragraaf 2.1.

Expliciete modellering van (het effect van) onderhoud op systeemgedrag is ongebruikelijk. Voordat onderzocht wordt welke methoden beschikbaar zijn, is een inventarisatie van de verschillende invloedsfactoren op zijn plaats. Een technisch object en het daarbij behorende onderhoudsysteem zijn onlosmakelijk verbonden. De verbondenheid komt tot uitdrukking in het totaal aan onderhoudsregels zoals deze zijn gebundeld in het onderhoudsconcept. Dit omvat tot op een zeer gedetailleerd niveau onder andere de keuze ten aanzien van de gekozen onderhoudspolitiek(en), een basisbegrip in het onderhoud. Een indeling van de elementaire onderhoudspolitieken wordt gepresenteerd in paragraaf 2.3. Belangrijk voor de modellering van (het effect van) de verschillende onderhoudspolitieken is de beschrijving van het componentgedrag; paragraaf 2.4 besteedt hieraan aandacht. In paragraaf 2.5 worden enkele praktijkaspecten vermeld, waarmee rekening gehouden moet worden. Er blijkt een grote diversiteit in de verschillende onderhoudspraktijken. Paragraaf 2.6 handelt over enkele algemene financiële begrippen en relaties, resulterend in een kostenmodel.

Aan het eind van iedere paragraaf wordt toegelicht wat de consequenties zijn van de genoemde aspecten voor het te ontwikkelen onderhoudsmodel. In paragraaf 2.7 worden de eindconclusies van dit hoofdstuk opgemaakt.

Paragraaf 2.1: Terminologie.

Er is geen algemeen aanvaarde Nederlandse terminologie op onderhoudsgebied. Ter introductie zullen in deze paragraaf een beperkt aantal begrippen worden geïntroduceerd. Voor een uitgebreider lexicon wordt verwezen naar de publicaties van Van der Mooren [1986] en van Van der Enden en Geraerds [1987], zie ook appendix B.

Component. Kleinste samenstellende deel in het onderhoudsmodel. Een component kan de modellering zijn van één onderdeel of van een samenstelling van onderdelen.

Conditie. Toestand van een systeem of een component voor zover het de materiële kenmerken betreft welke het vermogen bepalen zijn functie volgens gestelde eisen te vervullen

Correctief onderhoud. Acties met als doel een defect systeem in gebruiksgereede toestand terug te brengen.

Falen. Het overgaan van het object van de gebruiksklare in de defecte toestand.

Herstellen. Het uitvoeren van onderhoudsacties aan een al dan niet defect systeem met het doel een of meer onderdelen in hun oorspronkelijke conditie terug te brengen.

Onderdeel. Kleinste, normalerwijze niet demontabele eenheid in een object.

Onderhoud. Alle activiteiten die ten doel hebben een technisch systeem in de technische staat te houden of terug te brengen, die nodig wordt geacht voor de door het systeem te vervullen functie.

Object. De materiële verschijningsvorm van het beschouwde technische systeem, samengesteld uit onderdelen.

Onderhoudsconcept. Het stelsel van alle procedures (beslissingsregels, voorschriften, werkwijzen, etc.) dat men hanteert voor het uitvoeren van onderhoudsacties aan een systeem.

Onderhoudspolitiek. Beslissingsregel ten aanzien van het tijdstip waarop men preventieve onderhoudsacties aan een component uitvoert, met het doel het faalgedrag van een systeem te beïnvloeden.

Preventief onderhoud. Acties met als doel een niet defect systeem in gebruiksgereede toestand te behouden.

Preventie-interval. Periode tussen twee opeenvolgende preventieve acties.

Standtijd. Bedrijfsduur tot falen.

Systeem. Model van een object. Een systeem is opgebouwd uit componenten, onderling samenhangend volgens de functionele structuur.

Paragraaf 2.2: Systeemindeling.

Zoals vermeld is het modelleren van het systeemgedrag oorspronkelijk het terrein van de bedrijfszekerheidstechniek. De van oudsher toegepaste, eenvoudige rekentechnieken zoals de Booleaanse rekenmethode zijn echter beperkt in hun toepassingsbereik. Ter afbakening van de gewenste reikwijdte van het te ontwikkelen model is een systeemindeling zinvol. Verschillende criteria zijn mogelijk, zie onder andere Van der Mooren [1983].

Naar constructie: enkelvoudig versus samengesteld.

Met name voor de modellering van onderhoud is de indeling naar de aard van de constructie belangrijk. Er wordt onderscheid gemaakt tussen enkelvoudige en samengestelde systemen. Technische systemen zijn meestal opgebouwd uit meerdere onderdelen. Voor de hier bedoelde indeling is dat echter minder relevant. Een systeem is te classificeren als enkelvoudig, wanneer één onderdeel het faalgedrag van het systeem bepaald. Worden als regel slechts (defecte) onderdelen vervangen, in een pomp bijvoorbeeld de lagers, de afdichting, etc., dan is er sprake van een samengesteld systeem. In de situatie van een productielijn kan het gebruikelijk zijn een pomp bij elk defect als geheel te vervangen door een reserve (als nieuw) exemplaar. De pomp is dan te beschouwen als een enkelvoudig systeem. In een model van de productielijn zal de pomp gemodelleerd worden als één component.

Naar onderhoudsmethodiek: wegwerpen versus herstellen.

Op grond van de toegepaste onderhoudsmethodiek zijn systemen in te delen in wegwerp-, respectievelijk herstelsystemen. Wegwerpsystemen zijn meestal relatief eenvoudige, in grote massa geproduceerde systemen; voorbeelden hiervan zijn lagers, schokbrekers, relais en vele huishoudelijke apparaten. Soms moeten ook complexe systemen in deze categorie worden gerangschikt, omdat reparatie na ingebruikname onmogelijk kan zijn. Dit geldt bijvoorbeeld voor een satelliet; na lancering kan reparatie van een dergelijk systeem hooguit bestaan uit het op afstand inschakelen van redundante deelsystemen. In het algemeen geldt dat voor wegwerpsystemen slechts het gedrag tot aan het eerste faalmoment belangrijk is.

Samengestelde systemen welke na falen weer in bedrijfsgerede conditie kunnen worden teruggebracht worden repareerbare ofwel herstelsystemen genoemd. Het belang van deze categorie objecten is in de werktuigbouwkundige praktijk groot. Als na falen

van één van de componenten alle beschadigde, maar niet noodzakelijk defecte componenten worden hersteld, is er sprake van een vernieuwingssysteem. Na herstel is het gehele systeem in (een zo goed als) nieuwe staat teruggebracht.

Dikwijls wordt alleen het defect geraakte onderdeel uitgewisseld voor een nieuw of gerepareerd exemplaar. Het systeem als geheel wordt niet in nieuwe staat teruggebracht. In deze situatie is het gedrag gedurende de gehele levensduur van belang, waarbij deze levensduur zich uitstrekt tot voorbij het eerste falen, vaak zelfs tot ver daarna.

Naar systeemtoestanden: two versus multi state.

Een in de literatuur veel voorkomende indeling is naar het aantal te onderscheiden toestanden waarin een systeem zich kan bevinden, 'two state' versus 'multi state', zie bijvoorbeeld Gits [1984]. Indien een systeem ofwel gebruiksgereed ofwel defect is, zijn slechts twee toestanden te onderscheiden: de 'two state' situatie. Voor een aantal systemen (veelal van beperkte omvang), zoals een tandwielkast en veel huishoudelijke apparaten, is de veronderstelling van binair gedrag een goede benadering van de realiteit. Zijn er meer systeemtoestanden te onderscheiden, dan is er sprake van een 'multi state' situatie. Een productielijn is 100% bedrijfsgereed als op volledige capaciteit kan worden geproduceerd. Een storing kan het systeem volledig stilleggen, maar vaak is het gevolg alleen een verminderde productiecapaciteit. De ernst van de storingen varieert. Met dergelijke mogelijkheden (degraded states) moet vooral in beschikbaarheidsanalyses rekening gehouden worden.

Ook op componentniveau kan de multi state situatie bestaan, direct afhankelijk van de grootte en complexiteit van de componenten in het model. Meestal wordt op dit niveau een two state situatie verondersteld. Literatuur over de modellering van multi state systeem- of componentgedrag is beperkt beschikbaar. De multi state situatie is in het algemeen mathematisch minder toegankelijk, zie bijvoorbeeld Watanabe [1986] en Bossche [1988].

Naar consequentie: verborgen versus openbarend falen.

Direkt in het verlengde van het voorgaande is te noemen de indeling naar de gevolgen van het falen van een component of een systeem. Indien falen van een component direkt wordt opgemerkt, bijvoorbeeld door systeemuitval of door registratie in de regelkamer, dan is dit een zich openbarend falen. Verborgen falen treedt op als het feitelijke faalmoment onopgemerkt blijft. Een defect geraakte noodstroomvoorziening openbaart zich pas op het moment dat de installatie aangesproken of geïnspecteerd wordt. Voor met name veiligheidssystemen is deze faalwijze van bijzonder belang.

Paragraaf 2.2.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.

Uitgaande van de indeling naar systeemcategorie zal het te formuleren onderhoudsmodel worden opgezet voor toepassing op samengestelde, repareerbare systemen. Toepassing in een minder complexe situatie is mogelijk, maar dikwijls zijn daarvoor eenvoudiger modellen beschikbaar.

Onderhoud is meestal een zeer gedetailleerd proces, het vindt plaats op het niveau van de onderdelen. Daarom moet het uitgangspunt zijn dat de kleinste als eenheid te vervangen delen van een systeem worden gemodelleerd als componenten in het model (least replaceable assembly). Een enkele component kán derhalve een samenstelling van onderdelen (module) modelleren. Het aantal te onderscheiden onderdelen in een systeem en daarmee het potentiële aantal componenten in het model is in veel gevallen groot. Uit praktische overwegingen zal een systeemmodel in het algemeen beperkt worden tot de componenten die een relevante bijdrage aan het systeemgedrag en daarmee aan de onderhoudsinspanning leveren.

De informatiebehoefte om een dergelijk model van gegevens te voorzien neemt meer dan evenredig met het aantal componenten toe, als gevolg van de onderlinge afhankelijkheden tussen die componenten. Dit niet te onderschatten nadeel wordt gedeeltelijk gecompenseerd door een aantal voordelen. Zo neemt de herkenbaarheid en daardoor de acceptatie van een dergelijk model binnen de onderhoudspraktijk toe en dit bevordert de implementatie. Een belangrijk voordeel is verder de verantwoorde toepassing van het vernieuwingsmodel op componentniveau. Een defect onderdeel wordt dikwijls vervangen door een (als) nieuw exemplaar. Na reparatie kunnen evenwel montagefouten een storingsbron zijn, zodat zo *goed* als nieuw kán betekenen zo *slecht* als nieuw. In de praktijk wordt na een systeemrevisie vaak een verhoogd aantal storingen geconstateerd.

Volledig herstel van *het systeem* wordt in veel praktijksituaties niet nagestreefd. Het systeem als totaliteit verouderd en vertoont een instationair gedragspatroon. Voor veel technische systemen is deze veroudering een bekend verschijnsel. Verschillende modellen voor de beschrijving van een afnemende bedrijfszekerheid, maar ook voor bedrijfszekerheids groei zijn opgesteld. Balaban [1978] presenteert een beperkt overzicht. Ascher en Feingold [1984] geven toelichting en commentaar op zowel groei- als verouderingsmodellen.

De noodzakelijke gedetailleerdheid in de modelopbouw maakt dat de indeling naar systeemgedrag minder relevant is. Door de functionele samenhang tussen de componenten kan worden gemodelleerd wat de consequentie is van het uitvallen van een

component. Zo kan de ernst van het falen van een component worden ingebracht. Wanneer meerdere productieniveaus te onderscheiden zijn, is een modellering van een parallelschakeling van (two state) componenten mogelijk, waarbij aan elk van de componenten een zekere capaciteit moet worden toegekend. Verder zal het onderhoudsmodel primair gericht zijn op zich openbarende defecten. Op de modellering van systemen met verborgen defecten zal niet expliciet worden ingegaan. Studies aan dergelijke systemen betreffen meestal het optimaliseren van een inspectie- interval, zie bijvoorbeeld Sherwin [1979] en Kabir [1988]. Voor de meeste technische systemen mag verondersteld worden dat falen (vrijwel) direct wordt opgemerkt.

Paragraaf 2.3: Onderhoudspolitiek en onderhoudsconcept.

In zijn 'ontwerpkader voor het onderhoudsconcept' gaat Gits [1984,1987] uitgebreid in op de verschillende elementaire onderhoudspolitieken. Deze paragraaf heeft als doel de gestelde ontwerpeisen aan het hier voorgestelde, kwantitatieve model eenduidig vast te leggen, ten eerste voor de te modelleren elementaire onderhoudspolitieken, paragraaf 2.3.1. De keuze en de kwantificering van de onderhoudspolitiek worden beïnvloed door de afhankelijkheden tussen de componenten, hierover handelt paragraaf 2.3.2. De consequenties voor het onderhoudsmodel zijn samengevat in paragraaf 2.3.3.

Paragraaf 2.3.1: Elementaire onderhoudspolitieken.

Een elementaire onderhoudspolitiek is een beslissingsregel ten aanzien van het tijdstip waarop men preventieve onderhoudsacties aan een component uitvoert. Onderscheiden kunnen worden: defect- of storingsafhankelijk onderhoud en preventief onderhoud. Bij storingsafhankelijk onderhoud (S.A.O.) vinden geen preventieve, doch slechts correctieve acties plaats. Zowel S.A.O. als preventief onderhoud bestaat voor een belangrijk deel uit het weer in nieuwe staat terugbrengen van één (of meer) component(en). Onder preventief onderhoud ressorteert echter ook het verzorgende onderhoud, zoals smeren, schoonmaken, schilderen, etc. Dit verzorgende onderhoud zal niet worden gemodelleerd. In het faalgedrag op componentniveau wordt impliciet verondersteld dat het gebruikelijke verzorgende onderhoud plaatsvindt. Met preventief onderhoud wordt in deze studie alleen het vernieuwen en het inspecteren van componenten bedoeld. Preventief onderhoud kan dan worden uitgevoerd volgens twee elementaire onderhoudspolitieken: gebruiksafhankelijk onderhoud en toestandafhankelijk onderhoud.

Gebruiksafhankelijk onderhoud. G.A.O., ofwel periodiek onderhoud.

Preventief onderhoud aan een component vindt plaats na realisatie van een te voren vastgestelde prestatie, bijvoorbeeld de bedrijfstijd, het aantal afgelegde kilometers, etc.

Toestandsafhankelijk onderhoud. T.A.O. Preventief onderhoud vindt plaats nadat de conditie van een component een tevoren opgestelde grens, de herstelgrens, heeft onderschreden, maar nog niet de faalgrens is gepasseerd.

Gebruiksafhankelijk onderhoud is naar zijn aard retrospectief, toestandsafhankelijk onderhoud prospectief. Op componentniveau kan in een aantal gevallen voor toepassing van meerdere preventieve politieken tegelijkertijd worden gekozen. In hoofdstuk 5 zal aan de keuze en de kwantificering van de politieken nader aandacht worden besteed.

Paragraaf 2.3.2: Onderhoudsconcept.

Het onderhoudsconcept is het stelsel van alle procedures (beslissingsregels, voorschriften, werkwijzen, etc.) dat men hanteert voor het uitvoeren van onderhoudsacties aan een (repareerbaar) systeem. In deze publicatie wordt in het bijzonder gerefereerd aan het onderhoudsconcept als de keuze en de kwantificering van de onderhoudspolitieken op componentniveau.

De regels die leiden tot de keuze en de optimalisering van de onderhoudspolitieken, zoals die van toepassing zijn op enkelvoudige systemen, zijn gewoonlijk slechts beperkt toepasbaar op componenten in een samengesteld systeem. Dit wordt veroorzaakt door de onderlinge afhankelijkheden tussen de componenten. Deze afhankelijkheden zijn te classificeren in drie typen, zie Thomas [1982] :

Functionele afhankelijkheid. Beschadiging en/of falen van één component kan de belasting op een andere component veranderen.

Structurele afhankelijkheid. De materiële structuur van een systeem maakt vervangen van niet gefaalde componenten noodzakelijk om het herstel te kunnen uitvoeren.

Economische afhankelijkheid. De totale kosten van gezamenlijk onderhoud van een aantal componenten kunnen lager zijn dan de som van de kosten van onderhoud aan elke component afzonderlijk, indien uitgevoerd op verschillende momenten.

In het algemeen wordt met structurele afhankelijkheid aangeduid dat er geen keuzevrijheid bestaat; niet defecte componenten moeten worden vervangen samen met het defecte exemplaar (pakkingen e.d). In geval van economische afhankelijkheid wordt naast het optreden van de gelegenheid een tweede criterium gehanteerd, zoals de leeftijd of de momentane conditie.

De grenzen tussen de verschillende categorieën zijn soms niet duidelijk aan te geven. Structurele en economische afhankelijkheid zijn een gevolg van de materiële structuur van een systeem. Niet defecte componenten kunnen eenvoudiger toegankelijk zijn tijdens het uitvoeren van een reparatie aan een andere component. In deze veel voorkomende situatie kan *gelegenheidsafhankelijk* of *opportunistisch onderhoud* aantrekkelijk zijn.

Opportunistisch onderhoud. Preventief onderhoud wordt pas uitgevoerd wanneer daartoe de gelegenheid zich aandient. De preventief te vervangen component moet dan ofwel een tevoren vastgestelde (minimale) prestatie hebben geleverd (opportunistisch G.A.O.), ofwel een zekere (minimale) conditie hebben onderschreden (opportunistisch T.A.O.).

Zo wordt in de praktijk bijvoorbeeld bij een auto het vervangen van een versleten koppelingsplaat meestal gecombineerd met het vervangen van het druklager en soms ook de drukgroep, afhankelijk van het inspectieresultaat. Een ander voorbeeld uit de procesindustrie is het preventieve onderhoud in het weekend of de vakantieperiode. Deze clustering van onderhoudsacties is een zeer belangrijk aspect in vrijwel elke onderhoudspraktijk. Tot slot van deze paragraaf dient te worden opgemerkt dat in de praktijk voor een repareerbaar systeem bijna altijd meerdere onderhoudspolitieken naast elkaar worden toegepast.

Paragraaf 2.3.3: Consequenties voor het onderhoudsmodel.

Van een onderhoudsmodel mag verwacht worden dat de verschillende elementaire onderhoudspolitieken kunnen worden gemodelleerd en tegelijk en naast elkaar kunnen worden toegepast conform het te modelleren onderhoudsconcept.

Gezien de noodzakelijke gedetailleerde opbouw van het onderhoudsmodel moet aan de onderlinge afhankelijkheden tussen de componenten tegemoet worden gekomen. Structurele en economische afhankelijkheid komen tot uitdrukking in moduulvorming en opportunistisch onderhoud, resulterend in een clustering van onderhoudsacties. Deze

clustering kan gepland en/of opportunistisch zijn; beide situaties moeten kunnen worden weergegeven om aansluiting te behouden op de onderhoudspraktijk.

Functionele afhankelijkheid zal niet als zodanig worden gemodelleerd. De benodigde gegevens zijn vrijwel niet voorhanden noch af te leiden uit de beschikbare informatie. Expliciete modellering is daardoor bijna niet mogelijk. Indien bekend is dat een dergelijke afhankelijkheid optreedt, zal in een groot aantal gevallen de beschadigde of extra belaste component gelijktijdig met de defecte component worden vervangen. Dit is dan een speciale vorm van structurele afhankelijkheid, die als zodanig wel kan worden opgenomen.

Paragraaf 2.4: Modellering van het componentgedrag.

Zowel faal- als herstelgedrag van componenten zijn stochastisch van aard, beide vormen de basis waarvan in principe het eveneens stochastische systeemgedrag kan worden afgeleid. In het faalgedrag zijn de belastbaarheid en de belasting van een component verdisconteerd. In beginsel kan het faalgedrag van een component worden afgeleid uit belasting, geometrie en materiaaleigenschappen. Dit is het terrein van de probabilistische sterkteleer, zie o.a. Spoormaker [1982].

Vooralsnog lijkt de weg van de bedrijfszekerheidsanalyse beter begaanbaar. Daarbij wordt het faalgedrag van een component gebaseerd op de empirisch bepaalde standtijden tot falen van onder overeenkomstige omstandigheden functionerende componenten, eventueel gecombineerd met expertmeningen. Op deze wijze gemodelleerd zijn in het faalgedrag niet alleen de normale en de abnormale functionele belastingen verwerkt, maar ook de verschillende omgevingsinvloeden, de eventuele montagefouten, etc.

Paragraaf 2.4.1: Begrippen uit de bedrijfszekerheidstechniek.

Het stochastische karakter van het componentgedrag kan worden gemodelleerd door het gebruik van kansverdelingen voor zowel faal- als herstelgedrag. De voor een dergelijke gedragsbeschrijving gehanteerde begrippen worden omschreven in een groot aantal publicaties, in de Nederlandse taal o.a. door Van der Mooren [1982]:

Faalkans, $F(t)$. De kans dat de standtijd van een onder bekende omstandigheden gebruikte component of een systeem, ten hoogste een bepaalde tijdsduur t bereikt (cumulative failure function).

Bedrijfszekerheid, $R(t)$. De kans dat de standtijd van een onder bekende omstandigheden gebruikte component of systeem de tijdsduur t overschrijdt.

Ook wel overlevingskans genoemd (reliability function).

Faalkansdichtheid, $f(t)$. Een maat voor de kans op falen van een in gebruik te nemen component of systeem gedurende de eerstvolgende tijdseenheid na het beschouwde tijdstip t (failure density function).

Faalintensiteit, $h(t)$, ook wel faaltempo. Een maat voor de kans op falen gedurende de eerstvolgende tijdseenheid na het beschouwde tijdstip t van een in gebruik zijnde component, onder de voorwaarde dat deze component gedurende de periode $(0,t]$ niet heeft gefaald (hazard rate function).

Resterende levensduur, $\mu(t)$. De verwachting van de resterende standtijd van een op tijdstip t functionerende component (mean residual life function).

Voor herstelgedrag zijn deels analoge definities te geven, zie Van der Mooren [1982]. De theoretisch samenhang tussen de eerste vier begrippen is weergegeven in tabel 2.1.

Voor de resterende levensduur geldt: $\mu(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \int_t^{\infty} R(u) du$. Vooral de relatie van $\mu(t)$

met $h(t)$ resp. $f(t)$ is complex. De relaties tussen de begrippen zijn voor iedere kansverdeling geldig, maar dikwijls zijn de analytische uitdrukkingen niet in gesloten vorm beschikbaar.

	$R(t)$	$F(t)$	$h(t)$	$f(t)$
$R(t)$	—	$1-R(t)$	$\frac{-1}{R(t)} \frac{dR}{dt}$	$\frac{dR}{dt}$
$F(t)$	$1-F(t)$	—	$\frac{1}{1-F(t)} \frac{dF}{dt}$	$\frac{dF}{dt}$
$h(t)$	$e^{-\int_0^t h(u) du}$	$1-e^{-\int_0^t h(u) du}$	—	$h(t) \cdot R(t)$
$F(t)$	$1-\int_0^t f(u) du$	$\int_0^t f(u) du$	$\frac{f(t)}{R(t)}$	—

Tabel 2.1: Functionele samenhang van $R(t)$, $F(t)$, $h(t)$ en $f(t)$.

Voor de beschrijving van het stochastische gedrag van reparerbare systemen zijn enkele aanvullende begrippen gedefinieerd, de belangrijkste daarvan is de faalfrequentie:

Faalfrequentie, $v(t)$. Het absolute aantal storingen gedurende de eerstvolgende tijdseenheid na het beschouwde tijdstip t van een in gebruik zijnd reparerbaar systeem (ROCOF, rate of occurrence of failures).

De soms geringe verschillen tussen de begrippen voor component- respectievelijk systeemgedrag, blijken in de praktijk een bron van veel misverstanden. Ascher en Feingold [1984] besteden aan dit onderwerp in een principiële discussie veel aandacht. De badkuipcurve is een voorbeeld van de geschetste oneendigheid in symbolisering. In een aantal publicaties wordt deze curve opgevoerd voor de beschrijving van componentgedrag, maar soms verschijnt dezelfde curve als modellering voor het gedrag van reparerbare systemen. Refererend aan de artikelen van Brillinger [1978], Krohn [1969] en Downton [1973] becommentariëren Ascher en Feingold dit misverstand; niet alleen de uitloop van de curve is essentieel verschillend, ook de betekenis.

Stel dat het faalgedrag van een component weergegeven wordt door een badkuip-curve; afgebeeld is dan het verloop van de faalintensiteit als functie van de standtijd. In deze curve heeft de $h(x)$ de volgende achtergrond: op $t = 0$ is een test bestaande uit p (identieke) componenten opgestart. Ten tijde $t = x$ zijn daarvan nog $p(x)$ componenten in bedrijf.

Voor grote waarden van p kan dan als natuurlijke schatter voor de faalintensiteit gedefinieerd worden:

$$\hat{h}(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{1}{p(x)} \left[\frac{p(x) - p(x + \Delta x)}{\Delta x} \right] \quad (2.1)$$

De faalintensiteit is daarmee een relatieve grootheid; het feitelijk aantal gebeurtenissen per tijdseenheid in vooral de laatste fase van de levensduur neemt sterk af ondanks het feit dat de faalintensiteit toeneemt, mogelijk zelfs tot oneindig.

Zoals gesteld, wordt dezelfde grootheid soms ook gehanteerd voor het modelleren van het gedrag van reparerbare systemen. Dan echter wordt het verloop van het feitelijke aantal gebeurtenissen $v(t)$, gerepresenteerd, de faalfrequentie ofwel de ROCOF. Als $N(t)$ het aantal gebeurtenissen is, dan is analoog aan de faalintensiteit de natuurlijke schatter voor de ROCOF gelijk aan:

$$ROCOF = \hat{v}(t) = \left[\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta(t)} \right] \quad (2.2)$$

Een repareerbaar systeem heeft in principe een oneindige levensduur, maar de ROCOF zal, in tegenstelling tot de faalintensiteit voor grote t beslist niet naar oneindig gaan, maar stabiliseren op een zeker niveau, (Drenick [1960]).

Het principiële verschil in component- respectievelijk systeemgedrag heeft eveneens invloed op de wijze waarop (faal)gegevens geanalyseerd en verwerkt moeten worden. Op dit punt zal in hoofdstuk 6 nog worden teruggekomen.

Paragraaf 2.4.2: Gebruikelijke kansverdelingen.

Onder bepaalde voorwaarden (zie hoofdstuk 6) kan voor de beschrijving van het stochastische faal- en herstelgedrag van een component een discrete of een continue verdeling gebruikt worden. Discrete verdelingen worden toegepast als de beschreven grootte slechts gehele waarden kan aannemen, bijvoorbeeld het aantal faalgebeurtenissen in een beperkte periode of het aantal starts dat een systeem storingsvrij doorstaat. Voorbeelden zijn de Poissonverdeling, de binomiale verdeling en de geometrische verdeling. Van de toepassing van discrete kansverdelingen wordt in dit proefschrift afgezien, omdat de standtijd en de hersteltijd in de meeste gevallen een continu karakter hebben. Bovendien geldt, althans in de modellering van het onderhoud, dat veel feitelijk discrete situaties goed kunnen worden benaderd met een continue verdeling.

Het gebruik van de meest gangbare continue verdelingen zal kort worden toegelicht. De algemene acceptatie ervan komt deels voort uit het feit dat het beschreven gedrag overeenkomt met de gangbare ideeën over de werkzame faalmechanismen en over de situatie welke geldt in de herstelpraktijk. Voor een uitgebreide toelichting van de gebruikelijke discrete en continue verdelingen wordt verwezen naar een veelheid aan beschikbare literatuur, bijvoorbeeld Barlow en Proschan [1965], Kapur en Lamberson [1977], Green and Bourne [1977], O'Conner [1981], Lewis [1987] etc.

Exponentiële verdeling.

De (negatief) exponentiële verdeling is veruit de meest gebruikte verdeling in bedrijfszekerheidstoepassingen, dankzij de geschikte mathematische eigenschappen. Essentieel is de geheugenloosheid voor de tijd dat een component al functioneert, gekenmerkt door een constante faalintensiteit. Hierdoor is de verdeling geschikt voor de beschrijving van faalgedrag veroorzaakt door willekeurig in de tijd verspreide, volkomen toevallige oorzaken.

Normale verdeling.

De verdeling voor de faalkans $F(t)$ is niet in een mathematisch gesloten vorm beschikbaar; de waarden zijn getabelleerd. De verdeling is gedefinieerd voor $-\infty \leq t \leq \infty$. Dit kan bezwaarlijk zijn, vooral wanneer relatief korte standtijden moeten worden gemodelleerd (correctie is mogelijk).

Als een stochastische variabele X gesommeerd kan worden uit een (groot) aantal, onderling onafhankelijke stochastisch verdeelde grootheden, dan kan volgens de centrale limietstelling deze variabele X benaderd worden door de normale verdeling. Een normale verdeling heeft een toenemende faalintensiteit en is daarmee geschikt voor het modelleren van degradatieverschijnselen.

Lognormale verdeling.

De verdeling wordt verkregen door de natuurlijke logaritme van een variabele Y als normaal verdeeld te veronderstellen. Evenals voor de normale verdeling is een gesloten mathematische uitdrukking voor de faalkans of de faalintensiteit niet beschikbaar, maar waarden kunnen eenvoudig worden bepaald met de tabellen van de normale verdeling. De lognormale verdeling is, op lineaire schaal uitgezet, een scheve verdeling.

De verdeling wordt zeer geschikt geacht voor de modellering van reparatietijd, zie Kline [1984]. Ook wanneer een faalmechanisme veroorzaakt wordt door een degradatie met een vast percentage per interval, zal de standtijd in het algemeen te beschrijven zijn door een lognormale verdeling.

Weibullverdeling.

Weibull kwam in 1939 langs empirische weg tot de formulering van deze nu zeer veel gebruikte verdeling [1951]. In de literatuur wordt de verdeling als twee of drie parameter-verdeling gepresenteerd, afhankelijk van het eventuele gebruik van de minimale levensduur, γ , als derde parameter. Gedurende de periode $(0, \gamma]$ komt falen niet voor. De (vorm)factor β is een indicatie voor de vorm (en deels de spreiding) van de verdeling, terwijl de karakteristieke standtijd η de ligging bepaalt, als $\gamma = 0$. In 36.8% van de gevallen wordt deze standtijd bereikt: als $t = \eta$, dan is $R(\eta) = 0.368$, voor elke $\beta > 0$. In de uiteenlopende publicaties wordt de karakteristieke standtijd in relatie tot de minimale standtijd op verschillende wijzen gedefinieerd.

In deze dissertatie zal gelden:

$$f(t)=0 \quad \text{voor } 0 \leq t \leq \gamma \quad (2.1)$$

en:

$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{(\eta-\gamma)^\beta} \exp\left\{-\left[\frac{(t-\gamma)}{(\eta-\gamma)}\right]^\beta\right\} \quad \text{voor } \gamma < t \leq \infty \text{ en } \beta > 0, \gamma \geq 0, \eta \geq \gamma.$$

De Weibullverdeling is evenals de lognormale verdeling een scheve verdeling. Door de drie parameters is de verdeling zeer flexibel. De verdeling blijkt een goede beschrijving te zijn van de situatie waarin verschillende faalmechanismen elk afzonderlijk oorzaak kunnen zijn van het falen van een component en waarbij de eerst optredende faaloorzaak het defect raken veroorzaakt. Dit is de modellering van de zwakste schakel in een keten.

Voor $\beta = 1$ (en $\gamma = 0$) gaat de verdeling over in een exponentiële verdeling, met een constante faalintensiteit. Een afnemende faalintensiteit wordt bereikt bij $\beta < 1$, $\beta > 1$ modelleert een toenemende faalintensiteit. De combinatie van een positieve γ met een $\beta \leq 1$ is niet logisch; dit geeft op $t = \gamma$ een sprongfunctie in (o.a.) de faalintensiteit.

Voor $\beta = 2$ (en $\gamma = 0$) is de verdeling identiek aan de Rayleighverdeling, voor $\beta = 3.5$ (en $\gamma = 0$) wordt de normale verdeling goed benaderd. Gebruikelijke waarden voor β zijn $0.5 < \beta < 5$. De lognormale verdeling behoort niet tot de Weibull 'familie'. Vooral als voor de gegeven data-set een Weibullverdeling met β is ca. 1.8 wordt gevonden, kan een lognormale verdeling een geschikter alternatief blijken. Voor hogere waarden van β kan de hier verder niet besproken Extreme waarde verdeling voor de kleinste waarden een betere keuze zijn, zie de opgegeven literatuur.

Overige opmerkingen.

In de literatuur wordt over breed scala aan verdelingen voor de beschrijving van faalgedrag gerapporteerd. Te noemen zijn de Extreme waarde verdelingen, geschikt voor de beschrijving van fenomenen met een extreem karakter, zoals de hoogte van golven en de mortaliteit van oudere mensen, of de Birnbaum-Saunders verdeling [1969], als model voor het voortschrijden van vermoeiingsscheuren tot aan breuk, etc.

De soms subtiele verschillen tussen de verschillende verdelingen suggereren een grote nauwkeurigheid in de modellering. Deze nauwkeurigheid moet dan wel worden ondersteund door een groot aantal waarnemingen of door een nauwkeurig inzicht in het fysische (faal)proces. Juist voor de beschrijving van het faalgedrag van mechanische componenten is het aantal bruikbare gegevens meestal gering.

De hieruit voortkomende onbetrouwbaarheid in modellering van het faalgedrag is vaak vele malen belangrijker dan de mogelijke verfijning door keuze van de meest geschikte verdeling. Hierdoor is, vooral op componentniveau, voor de modellering van faalgedrag de best passende Weibullverdeling in veel gevallen toereikend. Ook indien meer dan één faalmechanisme werkzaam is op een component kan het gedrag dikwijls nog beschreven worden door een combinatie van Weibullverdelingen. Enigszins een uitzondering vormt de lognormale verdeling. Het karakteristieke verloop hiervan kan niet correct worden benaderd door een Weibullverdeling. Zoals al vermeld kan de lognormale verdeling in een aantal gevallen een goed alternatief blijken.

Paragraaf 2.4.3. Toepassing.

De meerderheid van de uit de literatuur bekende combinatorische analytische rekenmethoden, voor het rekenen aan samengestelde systemen, veronderstellen een constante faalintensiteit. Deze veronderstelling voor het faalgedrag houdt in dat de kans op falen van een component niet afhangt van het op een zeker moment gerealiseerde aantal bedrijfsuren, maar dat falen wordt veroorzaakt door toevallige oorzaken, zoals overbelasting en dergelijke. In een aantal gevallen lijkt deze veronderstelling aanvaardbaar; onder andere elektronische componenten worden dikwijls als voorbeeld genoemd. Technische veroudering (bijv. van isolatie), met als gevolg een toenemende faalintensiteit, speelt pas na lange tijd (>10jaar) een rol. De meeste elektronische apparaten bereiken deze leeftijd niet, gezien de veel snellere economische veroudering in deze sector. Maar eventuele inloop- of montageverschijnselen zullen zich vooral in de beginperiode openbaren, beide kunnen niet worden gemodelleerd door een constante faalintensiteit. Voor systemen van werktuigbouwkundige aard sluit een modellering met een constante faalintensiteit niet aan bij de praktijk. Faalmechanismen als slijtage, corrosie, vermoeiing en dergelijke verlopen immers afhankelijk van de 'tijd' en zijn direct na ingebruikname al actief. Het veroorzaakte faalgedrag is niet toevallig.

Een categorie waarbij de veronderstelling van een constante faalintensiteit acceptabele resultaten lijkt te geven is de situatie waarin de componenten in een model in feite *complexe (deel)systemen* zijn. In een bedrijfszekerheidsstudie kan een complete dieselmotor gemodelleerd worden door een enkele component. Door de verscheidenheid aan onderdelen in een dergelijk systeem wordt na een aantal reparaties een zekere evenwichtstoestand in het systeemgedrag bereikt, gekarakteriseerd door een constante faalintensiteit, zie o.a. Singh en Billinton [1974,1975], O'Conner [1981] en Ascher en Feingold [1984].

Het is echter niet duidelijk hoe voor een praktische situatie berekend kan worden wanneer dit evenwicht zich heeft ingesteld. De soms gehanteerde vuistregel dat alle componenten een keer vervangen moeten zijn, is niet werkbaar; een aantal componenten zal normalerwijze nooit vervangen worden gedurende de levensduur van een systeem. Ervaring wijst uit dat een reëel technisch systeem pas na lange tijd dit gedragsevenwicht zal bereiken, zie ook hoofdstuk 8. Vaak is dan al een groot deel van de levensduur verstreken, of is het systeem inmiddels zelfs afgedankt.

Op componentniveau wordt voor het hanteren van een constante faalintensiteit soms gewezen op het middenstuk van de zogenaamde badkuipcurve. In veel literatuur wordt deze curve min of meer uitvoerig beschreven, zie onder andere 'Methoden voor het bepalen en verwerken van kansen' [1987]. De eerste fase wordt gekarakteriseerd door een afnemende faalintensiteit; de initiële, hoge faalintensiteit neemt af met toenemende bedrijfsduur. Vervolgens dient zich een periode aan waarin falen optreedt door toevallige (meestal externe) oorzaken als bedieningsfouten, overbelasting etc. Daarna volgt een laatste fase waarin verouderingsverschijnselen overheersen. Deze periode wordt gekenmerkt door een toenemende faalintensiteit.

Gesteld wordt dat de periode met een constante faalintensiteit een belangrijk deel van de levensduur beslaat. In Green and Bourne [1977] wordt aangevoerd dat de componenten binnen een systeem zodanig ontworpen zijn en gebruikt worden dat zij functioneren binnen deze periode. Dit zou dan worden gerealiseerd door kwaliteitscontrole tijdens de productie, waardoor fabricage en/of montage fouten worden geëlimineerd. De laatste fase wordt naar hun zeggen niet bereikt daar de meeste componenten voordien al preventief vervangen zullen zijn!

Hoewel de curve in veel publicaties genoemd is, moet ze worden beschouwd als een sterk geïdealiseerde weergave van de werkelijkheid. Voor mechanische componenten is het bestaan ervan sterk aan twijfel onderhevig, in elk geval is de periode waarin de faalintensiteit constant is veel minder duidelijk dan vaak wordt voorgesteld. Hoewel er speciale verdelingen zijn die een badkuipcurve leveren, kan deze eventueel ook door een geschikte combinatie van (Weibull)verdelingen worden gemodelleerd. De ervaring leert echter dat voor het overgrote deel van de (eenvoudige) componenten in een onderhoudsmodel het faalgedrag met één verdeling kan worden gekarakteriseerd, waarbij in de praktijk zowel (sterk) afnemende, constante als toenemende faalintensiteiten zijn gevonden.

Door genoemde bezwaren heeft de veronderstelling van een constante faalintensiteit voor de beschrijving van het faalgedrag van een component directe gevolgen voor het invoeren van onderhoud als parameter in systeemgedrag. Immers, als op deze wijze componentgedrag gemodelleerd wordt door een exponentiële verdeling, bijvoorbeeld voor de mathematische eenvoud, dan kan het effect van preventief onderhoud op het overall faalgedrag van die component in een systeem niet worden geanalyseerd, terwijl dit preventieve onderhoud nu juist één van de mogelijkheden is dit gedrag te verbeteren.

Voor beschikbaarheidsberekeningen is naast het faalgedrag ook het herstelgedrag belangrijk. Analytische rekenmethoden veronderstellen soms eveneens een constante 'herstelintensiteit'. Een dergelijke veronderstelling wordt in het geheel niet ondersteund door de praktijk. Herstelgedrag is naar zijn aard eveneens stochastisch. Door onverwachte gebeurtenissen zoals afbreken of vastzitten van bevestigingsmiddelen of het niet beschikbaar zijn van reservedelen kan de hersteltijd zeer sterk toenemen. Een onverwacht korte hersteltijd komt vrijwel niet voor, in de herstelduur is meestal een ondergrens aan te geven. Indien de gehanteerde methode ruimte laat voor een keuze, wordt voor de beschrijving van herstelgedrag vaak een lognormale verdeling gehanteerd, of men modelleert eenvoudig de gemiddelde reparatietijd.

Normalerwijze is op componentniveau de gemiddelde reparatieduur minstens één orde kleiner dan de gemiddelde standtijd tussen twee storingen. Binnen de context van de probleemstelling is een zo exact mogelijke kwantificering van de reparatieduur in veel situaties minder belangrijk dan de juiste modellering van het faalgedrag.

Paragraaf 2.4.4: Consequenties voor het onderhoudsmodel.

Voor een juiste modellering van het effect van onderhoud op component- en systeemgedrag kunnen geen verstrekkende beperkingen worden toegelaten in de beschrijving van met name het faalgedrag van de componenten. Afnemende, constante en/of een toenemende faalintensiteit moeten kunnen worden gemodelleerd.

Enigszins afhankelijk van de componentkeuze kunnen meerdere faalmechanismen tegelijk werkzaam zijn op eenzelfde component. Dit kan resulteren in een faalgedrag dat niet door één enkele (gangbare) verdeling kan worden beschreven. Deze situatie moet gemodelleerd kunnen worden om reële aansluiting aan de praktijk te behouden.

Paragraaf 2.5: Overige invloedsfactoren.

In bijna alle situaties zijn de verschillende onderhoudspolitieken, de afhankelijkheden tussen de componenten en het stochastische karakter van faal- en herstelgedrag van die componenten belangrijke factoren in de modellering van het gedrag van repareerbare systemen. Nog vele andere, niet vermelde aspecten blijken invloed te hebben op het systeemgedrag en de onderhoudspraktijk. Ascher en Feingold [1984] presenteren een lijst van dergelijke factoren, 18 in totaal. Zij stellen daarbij terecht dat voor de uiteenlopende situaties steeds verschillende aspecten van doorslaggevende betekenis zijn. Een rangorde in importantie is dan ook niet aan te geven, bovendien is de lijst zeker nog aan te vullen. Het falen van een component hoeft niet altijd te leiden tot uitval van het systeem. Er kan sprake zijn van redundantie, een zodanige schakeling van componenten dat een (deel)functie kan worden vervuld door twee of meer componenten, waarbij elke component de vereiste prestatie kan leveren. Het uitvallen van één component leidt dan niet tot het uitvallen van het systeem. Misschien is reparatie mogelijk zonder dat het systeem faalt. Redundantie is een zeer krachtige methode om de bedrijfszekerheid en de beschikbaarheid van een systeem te beïnvloeden. Bovendien is er een duidelijke invloed op de keuze van de te volgen onderhoudspolitiek.

Een ander voorbeeld betreft de ernst van het falen. De directe gevolgen van falen kunnen niet altijd eenduidig worden uitgedrukt in storingsduur of materiële schade. In een aantal gevallen kan door een tijdelijke oplossing de onderhoudsactie uitgesteld worden tot een geschikt ogenblik; bij een auto bijvoorbeeld hoeft een defecte startmotor niet onmiddellijk te leiden tot uitval van de auto als geheel. Verder kan een systeem niet meer voldoen aan de gestelde normen door gelijktijdige slijtage aan diverse componenten, ondanks het feit dat geen van die componenten werkelijk faalde. Falen blijkt slechts op systeemniveau eenduidig te definiëren.

Reparaties kunnen onvolledig zijn, misschien is de juiste oorzaak van het falen niet gevonden. Toevallige combinaties van gebeurtenissen kunnen leiden tot een onverwacht lange hersteltijd, bijvoorbeeld het enige reserveexemplaar voor een aantal pompen kan juist in gebruik zijn. Vele van dergelijke factoren blijken te kunnen worden opgesomd. Geen twee praktijksituaties zijn identiek.

Veel van dergelijke praktijkaspecten zijn van belang voor de wijze van verwerking van de faalgegevens tot faalverdelingen en voor de analyse van het resultaat. Grove misrekeningen kunnen ontstaan wanneer menselijke fouten, resulterend in overbelasting

en falen van een component, niet als zodanig worden onderkend, bijvoorbeeld doordat de weergave in de registratie gemaskeerd is. Heslinga [1988] beweert dat slechts de helft van de faaloorzaken in de constructie van de component gezocht moet worden. Zolang niets aan de omstandigheden waaronder een component functioneert wordt veranderd, moet gerekend worden met een mogelijk opnieuw optreden van storingen door externe faaloorzaken.

Paragraaf 2.5.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.

Het sterk uiteenlopende karakter van de verschillende repareerbare systemen maakt de formulering van een universeel onderhoudsmodel bijzonder complex, zo niet onmogelijk. Vereenvoudigingen zijn daarom beslist noodzakelijk.

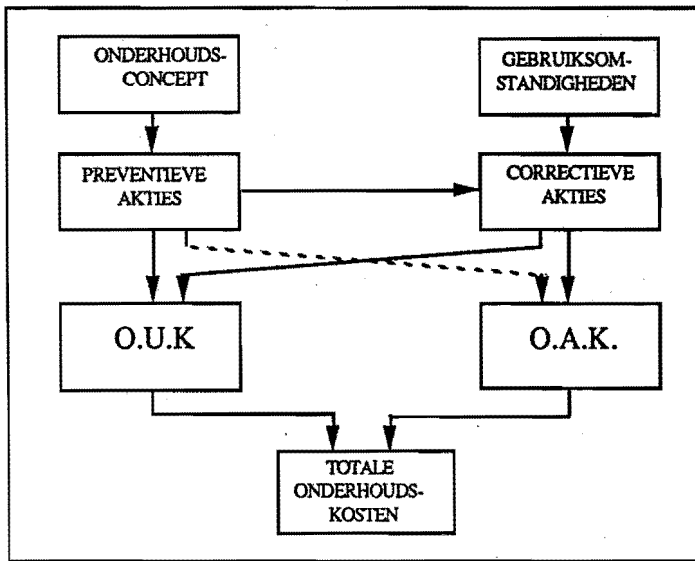
De op te zetten methodiek moet flexibel zijn, opdat voor de verschillende toepassingen en de noodzakelijke aanpassingen zo eenvoudig mogelijk kunnen worden gerealiseerd.

Paragraaf 2.6: Financiële aspecten.

In afwijking van wat in een bedrijfskundige omgeving dikwijls gebruikelijk is, wordt geen onderscheid gemaakt tussen kosten en uitgaven (=vermindering van de voorraad liquiditeiten). In de inleiding is vermeld dat onderhoudskosten slechts een deel uitmaken van de totale levensduurkosten. Investeren of ontwerpen met als doel minimale levensduurkosten is tot op heden echter een utopie gebleken. Een recent overzicht van de verschillende theorieën en toepassingsvoorbeelden wordt gegeven door Gupta en Chow [1986].

Met name het aandeel van de onderhoudskosten kan slechts bij benadering geschat worden. De belangrijkste factor is dat de (eigen) ervaring met een nieuw aan te schaffen systeem minimaal is. Voor de te verwachten beschikbaarheid van een nieuw systeem is hooguit een onnauwkeurige schatting mogelijk. Speciaal voor deze problematiek zijn een aantal nauw verbonden analysemethoden ontwikkeld en toegepast door Van der Mooren, Smith en Hankmann [1981,1985]; in hoofdstuk 3 wordt hierop teruggekomen.

Voor een bestaand systeem is een minimalisatie van de *totale* onderhoudskosten een werkbare doelstelling, mits in deze totaalkosten de onderhoudsuitvoeringskosten (O.U.K.) en onderhoudsafhankelijke kosten (O.A.K.) worden gesommeerd. In een classificatie van de onderhoudskosten onderkent Van der Mooren [1987] theoretisch 24 kostensoorten voor 12 actiesoorten. In een meer praktische benadering is het volgende kostenmodel opgemaakt, weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: Kostenmodel (bron: Van der Mooren 1987).

Conform paragraaf 2.3.1 wordt een opsplitsing gemaakt in de kosten voor de uitvoering van correctief en preventief onderhoud, waarbij onderlinge afhankelijkheid wordt onderkend. Het preventieve onderhoud wordt onderverdeeld in een verzorgend en een vernieuwend deel. De kosten voor inspecties en dergelijke kunnen worden toegevoegd aan de O.U.K. De aard en het aantal van dergelijke acties zijn meestal bekend en goed planbaar. Het vernieuwende preventieve onderhoud is qua omvang en aard eveneens voor een deel bekend en planbaar, hoewel soms pas op zeer korte termijn. Aan deze categorie kunnen (beperkte) O.A.K. worden toegekend. Van correctief onderhoud is het aantal acties en hun omvang in hoge mate onbekend. Evenmin zijn de acties planbaar, zodat naast de voor alle categorieën geldende O.U.K. meestal ook O.A.K. in rekening moeten worden gebracht.

De diverse kostensoorten zijn afhankelijk. Zo kan soms een reparatietijd worden teruggedrongen door inzet van meer mensen. Een toename in de O.U.K. heeft dan een vermindering van de O.A.K. tot gevolg. De impliciete veronderstelling dat onderhoudskosten evenredig zijn met het totale onderhoudsaanbod kan in een aantal gevallen onjuist zijn. Soms kan een onverwacht grote noodzaak tot onderhoudswerkzaamheden meer dan evenredig hogere kosten tot gevolg hebben, bijvoorbeeld door een tekort aan personeel of door materiaalgebrek.

Paragraaf 2.6.1: Consequenties voor het onderhoudsmodel.

Een kostencalculatie is essentieel voor een onderhoudsmodel. Het verschaft de mogelijkheid alle informatie onder één noemer te brengen, zodat vergelijking en optimalisatie mogelijk is. Het geschetste kostenmodel met daarin zowel O.U.K. als O.A.K. dient te worden aangehouden, zodat een totaal kostenbeeld gevormd kan worden. Een verdergaande verfijning kan zijn het omrekenen van de uitgaven van onderhoud naar de contante waarde. Eventueel kan het wenselijk zijn rekening te houden met premievoor- delen of belastingaspecten.

Hoewel aan de kostencalculatie de nodige aandacht moet worden geschonken is dit steeds een afgeleide van het systeemgedrag. Daarom dient de primaire doelstelling van het onderhoudsmodel een zo correct mogelijke beschrijving van dit systeemgedrag te zijn.

Paragraaf 2.7: Conclusies.

Uit de voorgaande hoofdstukken zijn aan aantal eisen af te leiden, waaraan het te ontwikkelen onderhoudsmodel dient te voldoen om realistische aansluiting bij de onderhoudspraktijk mogelijk te maken. Naast het S.A.O. moeten de diverse andere onderhoudspolitieken tegelijk en naast elkaar kunnen worden gemodelleerd waarbij zowel op systeem- als op componentniveau combinatie van deze politieken mogelijk moet zijn. Dit stelt hoge eisen aan de mate van detaillering van een dergelijk model en de beschrijving van het faal- en herstelgedrag op componentniveau.

Een dergelijke detaillering heeft zowel voor- als nadelen. Als belangrijkste voordeel kan genoemd worden dat het aannemelijk is dat het vernieuwingsmodel tot een goede benadering van de reële situatie leidt. Een nadeel is de toename in het aantal afhankelijkheden tussen de componenten, maar dit is eigen aan de te beschrijven problematiek. Een belangrijk nadeel is verder de grote hoeveelheid informatie nodig om het model van gegevens te voorzien.

Het niet kunnen volstaan met de modellering van faal- en herstelgedrag met een constante intensiteit heeft verstrekkende gevolgen. Hierdoor alleen al zijn op dit moment veel analytische rekenmethoden vrijwel ontoepasbaar. Bovendien is de meerderheid van de beschikbare informatiebronnen (bijv. data banken) voor het faal- en herstelgedrag van componenten slechts zeer beperkt bruikbaar. De gepresenteerde informatie bestaat vrijwel altijd uit een schatting van de gemiddelde faalfrequentie, nadrukkelijk ontoereikend voor gebruik in een onderhoudsmodel, zie ook hoofdstuk 6.

De zeer sterk uiteenlopende omstandigheden in de onderhoudspraktijk maken de opzet van een universeel toepasbaar onderhoudsmodel hoogstwaarschijnlijk onmogelijk. Aan dit gegeven kan enigszins tegemoet gekomen worden door een zo flexibel mogelijke opzet van het model.

In de financiële calculatie dient het model met zowel O.U.K. als O.A.K. te kunnen rekenen. De beoogde doelstelling met het resultaat van deze calculatie zal vooral zijn een leidraad te verschaffen in een optimalisatieproces.

In het volgende hoofdstuk zal worden nagegaan welke methoden ter beschikking staan voor de modellering van het gedrag van samengestelde repareerbare systemen en wat hun merites en beperkingen zijn in de beschrijving van onderhoud als expliciete factor in dat gedrag.

3 ONDERHOUD EN SYSTEEMGEDRAG

Beschikbare rekenmethoden.

Onderhoud is een belangrijke factor in het gedrag van repareerbare systemen. Omdat de modellering van systeemgedrag een essentieel deel uitmaakt van de bedrijfszekerheidscalculaties, is een inventarisatie gemaakt van de in dat vakgebied beschikbare analyse- en rekenmethoden voor (samengestelde) repareerbare systemen. Daarbij is nagegaan in hoeverre onderhoud is of kan worden gemodelleerd.

In hoofdstuk 2 is toegelicht dat aan een onderhoudsmodel andere eisen gesteld moeten worden dan aan een model voor de beschrijving van de bedrijfszekerheid of beschikbaarheid van repareerbare systemen. Zoals gesteld is een belangrijk verschil de noodzakelijke detaillering van een onderhoudsmodel. De beschrijving van het faal- en herstelgedrag van componenten is in een onderhoudsmodel analoog aan de modellering in de bedrijfszekerheidstechniek, maar de methoden voor de beschrijving van systeemgedrag zijn in de meeste gevallen essentieel anders. Dit zal worden toegelicht in dit hoofdstuk.

De beschikbare methoden zijn in te delen in verschillende categorieën. De eerste categorie wordt gevormd door de methoden welke kunnen worden toegepast in een zo vroeg mogelijk (voor)ontwerp stadium. In deze fase blijken de mogelijkheden tot beïnvloeding van de levensduurkosten veruit het grootst. Het accent in de analyses valt dikwijls op de meer kwalitatieve aspecten van het systeemgedrag, waarbij bovendien de aandacht meestal uitgaat naar veiligheids- en risicoaspecten. Een uitzondering hierop is de apart te bespreken onderhoudsanalyse.

Kenmerkend voor deze eerste categorie is dat de methoden toegepast kunnen worden wanneer een minimale hoeveelheid informatie over het feitelijke faal- en herstelgedrag van een systeem voorhanden is. In de praktische toepassing wordt in de verschillende analyses dan ook uitgegaan van een stationaire toestand van zowel component- als systeemgedrag. In paragraaf 3.1 zullen enkele methoden kort worden toegelicht.

Wanneer meer informatie voorhanden is kan de tweede categorie analysemethoden worden toegepast; hiervoor wordt niet a priori een gedragsevenwicht verondersteld. Naast kwalitatieve komen hier veelal de meer kwantitatieve aspecten van systeemgedrag aan de orde. In het algemeen is het doel van een dergelijke analyse te komen tot een

mathematische beschrijving van systeemgedrag en wel op een zodanige wijze, dat door extrapolatie een voorspelling van dit gedrag gedaan kan worden.

Zoals gesteld, zijn voor de toepassing meer (gedetailleerde) gegevens noodzakelijk, zodat de toepassing veelal bestaande systemen betreft. Voor de modellering van nieuwe projecten kan misschien worden teruggerepen naar identieke of gelijksoortige systemen. Ook in deze categorie is onderhoud dikwijls niet als expliciete parameter herkenbaar. In paragraaf 3.2 worden een aantal van de meest gebruikte methoden uit deze categorie toegelicht.

In paragraaf 3.3 worden enkele methoden specifiek gericht op het ontwerpen van een onderhoudsconcept aangestipt. Zij hebben veelal een bedrijfskundige achtergrond en zijn primair gericht op de managementaspecten van onderhoud. Paragraaf 3.4 bevat de conclusies van dit hoofdstuk.

Paragraaf 3.1: Analysemethoden, toepasbaar in de ontwerpfase.

In de ontwerpfase van een technisch systeem zijn gegevens waarop een gedragsanalyse kan worden gebaseerd beperkt. Toepassen van gedetailleerde en/of verfijnde rekenmethoden is in dit stadium niet zinvol. De gebruikelijke methoden zijn bedoeld om langs systematische weg te onderzoeken wat de consequenties zijn van het falen van één (of meer) componenten binnen een systeem, meestal uiteindelijk in kwantitatieve vorm. Vooral de analyse van veiligheidsaspecten is belangrijk.

Algemene literatuur over de beschikbare analysetechnieken (voor met name veiligheidstudies) wordt vermeld in het voorlichtingsblad no.2 van het Directoraat Generaal van de Arbeid [1982]. Dit blad geeft tevens aan in welk kader een dergelijke analyse kan worden uitgevoerd. Als wegwijzer in de keuze van de te hanteren methode is de PRA Procedures Guide [1983] beschikbaar.

Afhankelijk van de manier waarop een dergelijke studie kan worden opgezet zijn twee groepen te onderscheiden, *inductieve* respectievelijk *deductieve* methoden. In een inductieve analyse worden de gevolgen van een veronderstelde begingebourtenis geanalyseerd; bijvoorbeeld wordt onderzocht wat de consequenties zijn van het scheuren van een transportleiding voor de procesveiligheid. Voorbeelden van inductieve analysemethoden zijn de Preliminary Hazard Analysis (PHA), de Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) eventueel uitgebreid met een Criticality Analysis (CrA), de Fault Hazard Analysis (FHA) en Event Tree Analysis (ETA), ofwel de gebeurtenissenboom-analyse. Voor de FMEA en aanverwante analysemethoden wordt verwezen naar de SAE-uitgave van Hollenback Jr. [1977], handelend over de historische ontwikkeling

van deze en de hieruit voortgekomen methoden en de diverse toepassingsmogelijkheden. Als eerste fase in een systeemgedragsanalyse wordt in het algemeen de FMEA, of een variant daarvan, toegepast. De systematische ontwikkeling van de methodiek is omstreeks 1950 begonnen en is inmiddels geëvolueerd tot een samenhangend stelsel van analyses. Uitgewerkte voorbeelden van de ETA zijn te vinden in onder andere Asselin en Carlson [1977].

Een deductieve analysemethode wordt toegepast indien systematisch nagegaan wordt wat de oorzaken kunnen zijn van een als topgebeurtenis gepostuleerde (meestal ongewenste) systeemtoestand. In een deductieve methode kan dus onderzocht worden welke oorzaken kunnen leiden tot het scheuren van de genoemde transportleiding. Het belangrijkste voorbeeld van een deductieve analysemethoden is de Fault Tree Analysis (FTA), de foutenboom-analyse of correcter de faalboom-analyse, zie Heslinga [1988].

De verschillende analysemethoden zijn duidelijk gerelateerd en vullen elkaar aan. In een FHA bijvoorbeeld wordt geanalyseerd wat de volgschade kan zijn van het falen van een component en eventueel welke primaire schades aan het falen van de betreffende component voorafgaan. Om tot een kwantitatieve schatting van een onderzocht risico te komen, wordt bijvoorbeeld in een CrA de kans op falen van een component gecombineerd met het optredende gevolg.

Voor de bepaling van faalkans wordt vrijwel altijd impliciet een toevallig faalgedrag verondersteld. Soms wordt de faalintensiteit niet nauwkeuriger getaxeerd dan door classificatie, bijvoorbeeld van zeer laag tot zeer hoog. Een complete systeemanalyse omvat (in principe) alle mogelijke ongewenste gebeurtenissen en de daaruit voortkomende consequenties, waardoor een dergelijke analyse bijna altijd zeer tijdrovend is. Een computerprogramma kan daarbij goede diensten leveren.

De voornamelijk voor een gerichte analyse van veiligheidsaspecten toegepaste ETA (de gebeurtenissenboomanalyse) en de FTA (de foutenboomanalyse) zijn eveneens complementair. In een ETA worden de mogelijke gevolgen van een bepaalde gebeurtenis gerangschikt in een boomstructuur. Alle, in het kader van de studie, relevante mogelijkheden dienen te worden opgenomen, tezamen met de kans op het optreden van de begingebuurtenis.

De FTA stelt vast van welke omstandigheden en voorwaarden het optreden van de te bestuderen topgebeurtenis afhankelijk is. Elk van deze omstandigheden en voorwaarden wordt vervolgens op identieke wijze geanalyseerd, tot aan de basisgebeurtenissen, enkelvoudige gebeurtenissen van algemene aard. Op dit niveau moet informatie over het faalgedrag beschikbaar zijn of kunnen worden ingeschat.

De samenhang tussen een ETA en een FTA is als volgt: een ETA geeft inzicht in de mogelijke gevolgen van een enkele begingebuurtenis, terwijl een FTA beoogt duidelijk te maken op welke wijze en met welke waarschijnlijkheid een bepaalde (ongewenste) topgebeurtenis kan ontstaan. De FTA geeft daarmee de kwantitatieve invulling aan een ETA, welke deel kan uitmaken van bijvoorbeeld een veiligheidsstudie.

De FTA wordt in diverse uitvoeringen en toepassingen beschreven door Barlow [1977], het bekende Fault Tree Handbook is geschreven door Vesely, Goldberg, e.a. [1981]. Het voorlichtingsblad, 'Methoden voor het bepalen en verwerken van kansen' [1982] bevat met name voor de FTA en de ETA illustratieve voorbeelden en relevante literatuurverwijzingen. Ook de theoretische ondersteuning voor de kwantificering van een foutenboom wordt in dit voorlichtingsblad verstrekt.

De kwantificering van een foutenboom kan zowel de analyse van de bedrijfszekerheid als de analyse van de (niet-)beschikbaarheid tot doel hebben. In de uiteindelijke uitdrukking voor de bedrijfszekerheid of de beschikbaarheid van een systeem is de bijdrage van de verschillende componenten te herkennen. Daardoor kan onder andere een indruk verkregen worden van de evenwichtigheid in het ontwerp; zwakke, maar ook te sterk geconstrueerde schakels kunnen eruit worden gelicht. Verder kunnen verschillende detailconclusies worden getrokken, bijvoorbeeld over de gewenste inspectiefrequentie, een belangrijk aspect wanneer het niet beschikbaar zijn van een (veiligheids)systeem anders onopgemerkt blijft.

Het grootste deel van voorgenoemde publicaties en boeken beperkt zich tot de analyse van systemen welke opgebouwd zijn uit two-state componenten. In een recente studie beschrijft Bossche [1988] een uitgebreide methode voor faalboomanalyse welke geschikt is voor componenten waarvoor meer dan twee toestanden onderscheiden kunnen worden.

Hoewel de analysemethode in principe geen belemmeringen oplegt, wordt in de kwantitatieve analyse van de FTA dikwijls uitgegaan van een constante faalintensiteit, ofwel een toevallig faalgedrag, als modellering van het faalgedrag van de basisgebeurtenissen. Zoals is toegelicht kan door een dergelijke beperking het effect van onderhoud niet expliciet worden gemodelleerd.

In het Fault Tree Handbook [1981] wordt een evaluatie van enkele computerprogramma's ter kwantificering van faalbomen gegeven, zoals KITT, SAMPLE, MOCARS, etc. SAMPLE en MOCARS zijn zodanig geprogrammeerd dat het faalgedrag van de basisgebeurtenissen niet beperkt is tot een constante faalintensiteit. In de programma's wordt uit de ingevoerde faalkansverdelingen door simulatie een

(momentane) faalintensiteit bepaald. Deze gesimuleerde waarden worden volgens de systeemfunctie gecombineerd tot een deelresultaat. De systeemfunctie is het resultaat van de eerdere kwalitatieve analyse van de faalboom in de vorm van de verzameling van de minimale snedes (minimal cut sets). De procedure wordt een aantal keren herhaald en de verkregen deelresultaten worden bijeengevoegd tot het eindresultaat, een empirische verdeling van bijvoorbeeld de systeembeschikbaarheid.

SAMPLE omvat voor de modellering van het gedrag van de basisgebeurtenissen onder andere de normale en de lognormale verdeling. MOCARS is uitgebreider en omvat o.a. de Weibullverdeling. Een veelheid aan FTA programmatuur is inmiddels beschikbaar, recente voorbeelden zijn bijvoorbeeld Orchard, Cafts en SALP-PC¹.

Resumerend kan gesteld worden dat toepassing van de analysemethoden in deze categorie al mogelijk is in de ontwerpfase van een samengesteld systeem. Wel dient daarbij te worden bedacht dat met name de beschikbaarheid van de gegevens, maar ook de gehanteerde methode een belemmering kunnen vormen voor de gewenste detaillering van het model en daarmee voor de nauwkeurigheid van de resultaten.

Voor een aantal van de analysemethoden geldt dat eventueel voorhanden zijnde informatie over een tijdsafhankelijk componentgedrag niet als zodanig gebruikt kan worden. Ook in de uitgebreidere versies van de FTA is het effect van onderhoud op het systeemgedrag niet eenduidig te modelleren en te kwantificeren.

Een aparte, samenhangende groep van analysemethoden wordt gevormd door de onderhoudsanalyse, uitgewerkt door Van der Mooren en Hankmann [1985]. De gehanteerde methodiek vertoont gelijkenis met onder andere de FMEA, maar de onderhoudsanalyse is geheel toegesneden op het inventariseren van de onderhoudsbehoefte. De methode is geschikt voor toepassing in de (voor)ontwerpfase van een systeem, waarin de potentiële beïnvloeding van de levensduurkosten (en de onderhoudskosten) immers het grootst is. Afhankelijk van de aan de orde zijnde probleemstelling kunnen de volgende deelanalyses toegepast worden:

De checklistanalyse. Hiermee wordt nagegaan in hoeverre de constructieve kenmerken van een systeem voldoen aan algemene en/of specifieke aanbevelingen, gericht op onderhoudsaspecten. De analyse geschiedt dikwijls aan de hand van (specifieke) checklists.

¹ Orchard: FTA door. J Ogdon, Manchester, UK. Cafts: FTA door A. Pouchet, JRC Ispra. SALP-PC: FTA door S. Contini, JRC Ispra.

De gedragsanalyse. Uit de constructie en de gebruiksomstandigheden wordt door de analist geschat welke preventieve en correctieve onderhoudsacties zijn te verwachten, op gedetailleerd niveau geïnventariseerd naar aard, aantal en omvang.

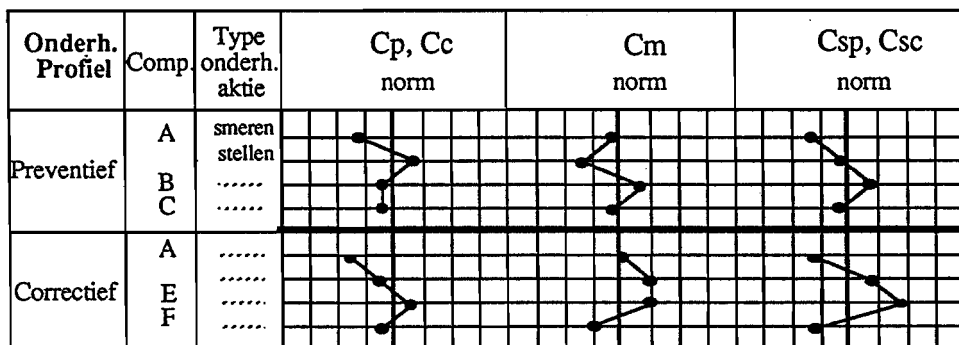
De kostenanalyse. Uitgaande van de gedragsanalyse wordt een schatting gemaakt van de totale onderhoudskosten.

De checklistanalyse valt buiten het kader van dit rapport en wordt verder buiten beschouwing gelaten. In de gedragsanalyse worden van de relevante componenten in een systeem de verschillende functies en faalwijzen systematisch geanalyseerd. Hierdoor kan een inventarisatie worden gemaakt van de mogelijke correctieve en preventieve acties, eventueel inclusief het verzorgende onderhoud. Het principe van de analyse is weergegeven in figuur 3.1. De in eerste opzet kwalitatieve analyse krijgt een kwantitatief vervolg door schatting van de te verwachten frequentie van de acties en de daarbij behorende offers, bijvoorbeeld de actieduur. Getracht wordt tot een oordeel te komen over het gedrag van zowel de componenten als het systeem als geheel. De grafische weergave van de analyseresultaten, het zogenaamde onderhouds(gedrags)profiel, laat op overzichtelijke wijze de uitschieters zien ten aanzien van frequentie en/of omvang, figuur 3.2.

De kostenanalyse bouwt voort op de uit de gedragsanalyse verkregen resultaten door berekening van zowel de O.U.K als de O.A.K., gesommeerd tot de totale onderhoudskosten. Zo worden de verschillende aspecten onder één noemer gebracht, belangrijk voor optimalisatiedoelinden. De analyseresultaten kunnen, indien gewenst, worden weergegeven in een zogenaamd kostenprofiel.

Aard v.d. ond. aktie	Comp	KWALITATIEF		KWANTITATIEF	
Preventief	A 1	Preventievrijheid. WAT?	Onderhoudbaarheid. HOE?	Preventievrijheid. HOE VAAK?	Onderhoudbaarheid. HOE GROOT?
	B 1 ...				
Correctief	A 1	Bedrijfszekerheid WAT?	Bedrijfszekerheid HOE VAAK?
	B 1 ...				

Figuur 3.1: Opbouw van de onderhoudsgedragsanalyse (bron: Van der Mooren, 1985).



Figuur 3.2: Onderhoudsprofiel (bron: Van der Mooren 1985).

- C_p, C_c = prev. resp. corr. onderhoudsfrequentie [per jaar],
 C_m = tijdsduur van de onderhoudsactie [uur],
 C_{sp}, C_{sc} = Totale duur van de prev. resp. corr. onderhoudsacties [uren per jaar], $C_{sp} = C_p * C_m$, $C_{sc} = C_c * C_m$.
norm = maximaal acceptabele grenswaarde.

Door de vergaande stylering van het onderliggende model is de methode niet acceptabel als onderhoudsgedragsmodel. In de gedragsanalyse wordt, net als bij de voorgaande analyses, impliciet een toevallig faalgedrag voor de componenten verondersteld. Een uitbreiding naar meer algemene faalverdelingen met een tijdsafhankelijke faalintensiteit is niet bekend. Het effect van preventief onderhoud op het storingsafhankelijke onderhoud moet worden geschat door de analist en door hem of haar tot uitdrukking worden gebracht in een verminderde faalfrequentie voor de beschouwde component. De componenten worden verondersteld onafhankelijk te zijn en daardoor komt ook de mogelijkheid tot clustering van onderhoud niet, of slechts zeer beperkt, tot uitdrukking in de resultaten.

Voor een vergelijking van ontwerpalternatieven, waarbij onderhoud als een belangrijk aspect gezien wordt, blijkt de methode zeer geschikt, Hankmann en Van der Mooren [1985] voorzien in een illustratie. Het model is echter niet ontworpen en ook niet geschikt voor de opzet of de evaluatie van een (ontwerp)onderhoudsconcept.

Paragraaf 3.2: Analytische methoden.

Het gedrag van een repareerbaar systeem zal in de meeste gevallen een min of meer duidelijke relatie hebben met de gebruiksduur van dat systeem. Met name voor mechanische systemen zal mettertijd de MTBF afnemen; van een nieuw apparaat wordt een hogere bedrijfszekerheid verwacht dan van een ouder exemplaar. In dezelfde terminologie is in hoofdstuk 2 gesproken over componentgedrag en de consequenties ervan voor de (stochastische) modellering. Systeemgedrag en componentgedrag lijken in veel aspecten identiek, maar zijn in feite verschillend, zie paragraaf 2.4.1.

De bepaling van systeemgedrag als functie van de tijd, uitgedrukt in de ROCOF (of soms in de systeembeschikbaarheid) in een gesloten mathematische vorm is één van de doelstellingen van de rekenmethoden der stochastische puntprocessen. Een stochastisch puntproces is een mathematisch model voor een fysisch fenomeen en wordt gekarakteriseerd door het voorkomen van gebeurtenissen welke zijn verdeeld in een continuüm (zoals b.v. faalgebeurtenissen in de tijd). Puntprocessen zijn in het algemeen mathematisch minder toegankelijk dan de gedragsmodellen die gebruik maken van kansverdelingen, zeker voor (bedrijfszekerheids) technici. Onder andere Cox en Lewis [1980] introduceren de toepassing van puntprocessen in een meer algemene context. Enkele in de bedrijfszekerheid gangbare basismodellen zullen worden toegelicht. Een uitgebreide beschrijving van deze en andere modellen is o.a. te vinden in Thompson [1988].

Paragraaf 3.2.1: Basismodellen.

Er zijn in principe twee manieren om het gedrag van samengestelde systemen te modelleren. Kenmerkend voor de eerste manier is dat een systeem als een 'Black Box', een enkelvoudig systeem, beschouwd wordt. Het faalgedrag van het systeem wordt gemodelleerd zonder op enigerlei wijze rekening te houden met de samenstellende componenten of de altijd aanwezige relaties tussen die componenten. Daartegenover staan de zogenaamde combinatorische rekenmethoden die juist uitgaande van het componentgedrag, het systeemgedrag trachten te synthetiseren.

De basismodellen voor de beschrijving van enkelvoudig systeemgedrag zijn het vernieuwingsproces en het Inhomogene Poisson Proces. Als speciaal geval van het vernieuwingsproces wordt het Homogene Poisson Proces toegelicht. De samenhang van het Homogene Poisson Proces en het Inhomogene Poisson Proces zal worden verduidelijkt.

Door de benadering van het systeem als 'Black Box' zijn deze basismodellen voor de expliciete modellering van onderhoud ongeschikt. Alleen voor de problematiek waarbij het systeem als enkelvoudig gezien mag worden zijn de modellen direct toepasbaar. Zo'n model kan evenwel gebruikt worden als basismodel (voor de beschrijving van componentgedrag) in een samengesteld systeem; superpositie tot een model voor complexe systemen is mogelijk: het gesuperponeerde vernieuwingsproces.

Paragraaf 3.2.1.1: Het Vernieuwingsproces en het Homogene Poisson Proces.

Een vernieuwingsproces (Renewal Process) RP doorloopt tijdens gebruik de cyclus functioneren, falen en herstel en is na ieder herstel (zo goed) als nieuw te beschouwen. Het eenvoudigste voorbeeld van een vernieuwingsproces is het gedrag van een systeem, bestaande uit een enkel moduul, dat na falen in zijn totaliteit wordt vervangen door een gelijkwaardig, nieuw exemplaar. Er bestaat grote gelijkenis met de modellering van componentgedrag, maar in tegenstelling tot dit laatste beschrijft het vernieuwingsmodel in principe het gedragspatroon van een reeks componenten over een (oneindig) lange periode.

De meest gebruikte toepassing van de theorie rond vernieuwingsprocessen is de bepaling van de kans op het aantal storingen $N(t)$ in het interval $[0,t]$. De opeenvolgende intervallen tussen de storingen vormen de waarnemingen X_1, X_2, \dots , welke worden verondersteld onderling onafhankelijk en identiek verdeeld te zijn. Veronderstel dat F de onderliggende verdeling voor X_i is, $F^{(n)}(t)$ is de n -voudige convolutie met zichzelf, op recursieve wijze gedefinieerd door:

$$F^{(n)}(t) = \int_0^t F^{(n-1)}(t-u) dF(u) \quad t \geq 0 \quad (3.1)$$

voor $n \geq 2$, met $F^{(1)}(t) = F(t)$. Laat $S_n(t)$ het tijdstip aangeven van de n de vervanging, dan geldt $F^{(n)}(t) = P[S_n \leq t]$. Definiëer voor de eenvoud $F^{(0)}(t) = 1$ voor $t \geq 0$ en $F^{(0)}(t) = 0$ voor $t < 0$, dan is:

$$P[N(t) = n] = F^{(n)}(t) - F^{(n+1)}(t)$$

zodat:

$$E N(t) = \sum_{k=1}^{\infty} F^{(k)}(t) \quad (3.2)$$

$N(t)$ is de vernieuwingsfunctie (Renewal Function). Onder de veronderstelling dat $N(t)$ differentieerbaar is, is $n(t) = dN(t)/dt$ het vernieuwingstempo, ofwel de ROCOF. In het algemeen is dit vernieuwingstempo een functie van de tijd, asymptotisch naderend naar $1/E[X]$. De vernieuwingstheorie is uitgebreid toegelicht door onder andere Smith [1958], Feller [1971] en door Barlow en Proschan [1965,1975].

Voor de in de bedrijfszekerheid meest gebruikelijke verdelingen is de analytische uitdrukking van de vernieuwingsfunctie niet beschikbaar, maar verschillende benaderingsmethoden zijn bekend, zie bijvoorbeeld McConalogue [1981] en Giblin [1984], de verbonden wiskunde is in veel gevallen slechts numeriek oplosbaar. Smeitink en Dekker¹ ontwikkelden recent een praktisch bruikbare benaderingsmethode, geschikt voor gebruik op een PC. In een vergelijking met bekende (o.a. simulatie-)resultaten blijkt de relatieve fout in de voorgestelde benadering voor de Weibullverdeling kleiner dan 3 % te zijn, zeker een voldoende nauwkeurig resultaat in de kwantificering van de onderhoudsproblematiek.

Voor gebruik in de praktijk kunnen (boven)grenzen voor de kans op een aantal storingen in een interval ook met eenvoudige formules worden geschat. Als bijvoorbeeld F gekenmerkt wordt door een toenemende faalintensiteit en een verwachting μ , dan geldt dat $R(t) \geq e^{-t/\mu}$ voor $0 \leq t \leq \mu$; hieruit volgt dat:

$$F^{(n)}(t) \leq 1 - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(t/\mu)^j}{j!} e^{-t/\mu} \quad (0 \leq t < \mu) \quad (3.3)$$

en daarmee:

$$P[N(t) \geq n] \leq \sum_{j=n}^{\infty} \frac{(t/\mu)^j}{j!} e^{-t/\mu} \quad (0 \leq t < \mu) \quad (3.4)$$

¹ E. Smeitink en R. Dekker, A simple approximation to the renewal function. Aangeboden aan: IEEE Transactions on Reliability, vermoedelijke publicatiedatum 1989.

Op deze wijze is afgeleid dat onder de veronderstelling van een toenemende faalintensiteit voor F , de Poisson verdeling voorziet in een bovenschatting voor de kans op n of meer storingen in het interval $[0, t]$ voor t lager dan de gemiddelde levensduur van een component. Barlow en Proschan [1975] geven deze en andere benaderingsformules voor meer algemene situaties, onder andere voor de twee-parameter-Weibullverdeling. Voor $F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$ is voor gehele waarden van $n = 1, 2, \dots$ af te leiden, mits $\beta \geq 1$:

$$P[N(t) \leq n] \geq \sum_{j=0}^n \frac{[t/\eta]^{j\beta}}{j!} e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (t \geq 0, \beta \geq 1) \quad (3.5)$$

Ook voor de Weibullverdeling kan $F^{(n)}$ slechts numeriek bepaald worden, zodat een dergelijke benaderingsformule in de praktijk waardevol blijkt, bijvoorbeeld voor een verantwoorde bepaling van het minimum aantal reserveonderdelen.

In het limietgeval voor $(t \rightarrow \infty)$ zijn voor de gebruikelijke kengetallen voor systeemgedrag eenvoudige mathematische uitdrukkingen op te stellen. Voor het gewone vernieuwingsproces, waarbij de invloed van de reparatietijd wordt verwaarloosd, geldt bijvoorbeeld dat het gemiddelde interval tussen twee faalgebeurtenissen, de MTBF, op systeemniveau uitkomt op:

$$\frac{1}{\text{ROCOF}} = \text{MTBF} = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \quad (3.6)$$

Aan de aard van de faal- en herstelverdelingen zijn geen beperkingen opgelegd, zodat de ROCOF in het algemeen afhankelijk zal zijn van de tijd en eerst asymptotisch bovenstaande waarde zal benaderen.

Een uitbreiding op het gewone vernieuwingsproces vormt het alternerende vernieuwingsproces, ARP, waarbij de benodigde periode voor onderhoud eveneens als stochastische grootheid wordt beschouwd. Er ontstaat een combinatie van elkaar afwisselende vernieuwingsprocessen waaruit zowel de momentane $v(t)$, de ROCOF als de momentane beschikbaarheid $A(t)$ kunnen worden afgeleid, evenals de asymptotische waarde voor beide grootheden.

Indien in een gewoon vernieuwingsproces het faalproces exponentieel wordt verondersteld, ontstaat het Homogeen Poisson Proces, HPP. Ook hierin worden de opeenvolgende intervallen tussen de storingen, de waarnemingen X_1, X_2, \dots als onderling onafhankelijk en identiek verdeeld verondersteld, en wel identiek verdeeld volgens de exponentiële verdeling $F(t) = 1 - e^{-pt}$.

Het stochastische proces van het aantal storingen in het interval $[0, t]$ voor $t \geq 0$, voorgesteld door $N(t)$, met $N(0) = 0$, kent onderling onafhankelijke incrementen. $N(t)$ is nu een (homogeen) Poissonproces met intensiteit p . Daarmee geldt:

$$P[N(t) \leq k] = \sum_{j=0}^k e^{-pt} \frac{(pt)^j}{j!} \quad (t > 0) \quad (3.7)$$

ofwel:

$$P[N(t_2) - N(t_1) = j] = \frac{e^{-p(t_2-t_1)} \{p(t_2-t_1)\}^j}{j!} \quad (t > 0) \quad (3.8)$$

Voor dit proces is ook de ROCOF, ter onderscheiding van het vernieuwingsproces, aangeduid met p . De ROCOF voor het HPP (en het NHPP) wordt ook wel aangeduid met het begrip *peril rate*. Voor het HPP is de ROCOF en daarmee de MTBF onafhankelijk van de tijd. De bedrijfszekerheidsfunctie is $R(t) = e^{-pt}$.

In veel literatuur wordt deze exponentiële verdeling voor de beschrijving van zowel component- als systeemgedrag gebruikt. Met name de overeenkomsten tussen een HPP en een exponentiële verdeling zijn er oorzaak van dat voor de modellering van component- en systeemgedrag identieke methoden en terminologie gehanteerd werden en worden. Ascher en Feingold [1979] belichten de (geringe) verschillen tussen een HPP en de modellering van componentgedrag door de exponentiële verdeling.

Het gedrag van een enkelvoudig systeem kan in een aantal gevallen gemodelleerd worden als vernieuwingsproces. Zoals gesteld, is het als model voor de beschrijving van het gedrag van samengestelde systemen meestal ongeschikt; vaak worden slechts één of enkele componenten in een systeemmodel vernieuwd tijdens een onderhoudsactie, terwijl de overige ongemoeid gelaten worden. Het vernieuwingsproces vormt echter de basis voor het zogenaamde gesuperponeerde vernieuwingsproces (het Superimposed Renewal Process), SRP, waarbij de componenten in een model worden gemodelleerd als een RP (of eventueel als ARP). Eerst echter wordt als basismodel het Inhomogene Poisson Proces toegelicht.

Paragraaf 3.2.1.2: Het Inhomogene Poisson Proces.

Het verschil tussen een HPP en een NHPP is het onderscheid in de ROCOF; voor een HPP is de ROCOF constant, voor het NHPP tijdsafhankelijk. Het aantal gebeurtenissen in een interval (t_1, t_2) is Poisson verdeeld en is over dat interval gemiddeld

gelijk aan $\int_{t_1}^{t_2} \rho(t) dt$, zodat voor $(t_2 > t_1 \geq 0)$ geldt:

$$P[N(t_2) - N(t_1) = j] = \frac{e^{-\int_{t_1}^{t_2} \rho(t) dt} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} \rho(t) dt \right\}^j}{j!} \quad (3.9)$$

De bedrijfszekerheidsfunctie van een NHPP is:

$$R(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \rho(t) dt}$$

Het ogenschijnlijk geringe verschil met een HPP resulteert in een belangrijk onderscheid tussen beide: voor een NHPP zijn, in tegenstelling tot het vernieuwingsproces (en het HPP), de gebeurtenissen X_1, X_2, X_3, \dots niet meer onafhankelijk, noch identiek verdeeld. Voor de $\rho(t)$ van een NHPP bestaan enkele bekende, veel toegepaste uitdrukkingen, bijvoorbeeld $\rho_1(t) = e^{\alpha t^{\alpha-1}}$, Cox en Lewis [1966] of $\rho_2(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}$, naar Duane [1964].

De overeenkomsten van een NHPP (en logischerwijze het HPP), met een (faal)kansverdeling voor de modellering van componentgedrag zijn door de jaren heen door velen bediscussieerd. Ascher en Feingold [1984] sommen op: Balaban, Feigin, Brown, Proschan, Thompson, McBride etc. Telkens wordt gepleit voor een strikte scheiding tussen beide modellen, vooral omdat de verwerking van gegevens voor de karakterisering van een NHPP niet identiek is aan de verwerking van (onderling onafhankelijke en identiek verdeelde) gegevens tot een kansverdeling, zie ook hoofdstuk 6.

De basisgedachte achter het NHPP is het reeds genoemde feit dat na een reparatie het aantal vervangen componenten in het algemeen klein is ten opzichte van het totale aantal in het systeem: het overgrote deel wordt ongemoeid gelaten. Het is daarom aannemelijk, te veronderstellen dat een systeem als geheel na reparatie van een defect weer even goed is als juist daarvoor. Deze veronderstelling geeft direct aan, dat een NHPP geen correct

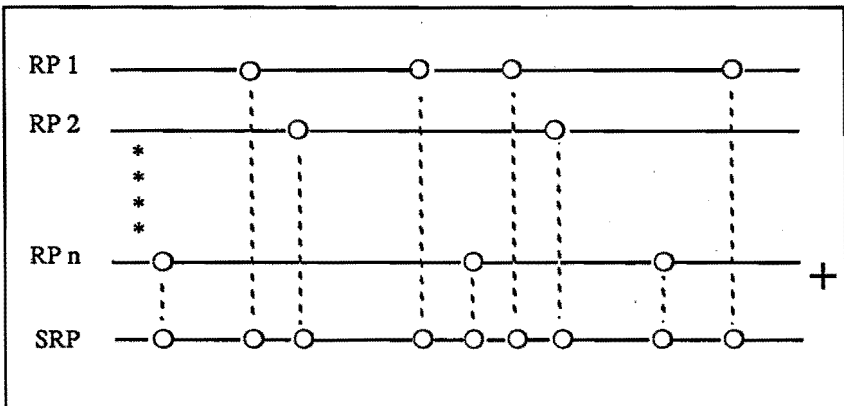
model voor een repareerbaar systeem kan zijn. Voor de modellering van (het effect van) onderhoud is het NHPP ongeschikt.

Een NHPP kan weliswaar een trend in systeemgedrag modelleren, waarmee door extrapolatie een voorspelling gedaan kan worden voor het toekomstig systeemgedrag, maar informatie over een gesignaleerde trend op systeemniveau is onbruikbaar voor beslissingen over het (op component niveau) uit te voeren onderhoud. Dit is telkens het bezwaar van de 'black box' benadering in systeemmodellering. Alleen als onderhoud op systeemniveau moet worden uitgevoerd, bijvoorbeeld een systeemrevisie, is dergelijke informatie relevant. Dit is de belangrijkste reden waarom het RP (inc. het HPP) en het NHPP als gedragsmodel voor de modellering van onderhoud maar zeer beperkt bruikbaar zijn.

Paragraaf 3.2.2: Het gesuperponeerde vernieuwingsproces.

Het gesuperponeerde vernieuwingsproces SRP (Superimposed Renewal Process), wordt beschouwd als het basis-gedragsmodel voor repareerbare systemen met onderling onafhankelijke, in serie geschakelde componenten. Hierbij wordt het gedrag van iedere component gemodelleerd als vernieuwingsproces.

Het SRP is als volgt voor te stellen: veronderstel n vernieuwingsprocessen die onafhankelijk van elkaar functioneren. Het proces dat gevormd wordt door de vereniging van de deelprocessen is dan het gesuperponeerde vernieuwingsproces, zie figuur 3.3. Een systeem wordt daarbij niet meer gezien als 'Black box'.



Figuur 3.3: Superpositie van vernieuwingsprocessen.

Het mag duidelijk zijn dat in het algemeen de combinatie van een aantal vernieuwingsprocessen niet opnieuw een vernieuwingsproces vormt, tenzij elk van de samenstellende vernieuwingsprocessen in feite een HPP is, zie Barlow en Proschan [1975]. De superpositie van n onafhankelijke HPP's resulteert opnieuw in een HPP met een

$$\text{ROCOF } \rho_s = \sum_{i=1}^n \rho_i .$$

In de literatuur wordt veel aandacht geschonken aan de mathematische beschrijving van het gedrag van het SRP als functie van de tijd. Evenals bij het RP kunnen veel van de relevante gedragskenmerken in het limietgeval voor $t \rightarrow \infty$ en n naar oneindig als eenvoudige mathematische uitdrukkingen worden gepresenteerd, maar het analyseren van het tijdsafhankelijke systeemgedrag is een complexer probleem gebleken. In hoofdstuk 8 wordt op deze problematiek verder ingegaan.

Binnen een SRP zijn geen beperkingen opgelegd aan de aard van het faalgedrag dat ten grondslag ligt aan de samenstellende RP's (en eventueel het herstelgedrag in de ARP's). Hierdoor is in principe het effect van bijvoorbeeld gebruikafhankelijk preventief onderhoud te modelleren. Hoewel de methode niet behoort tot de categorie die het systeem als 'Black Box' beschouwt, is het SRP toch niet goed te gebruiken als onderhoudsmodel, wegens de eis van onderlinge afhankelijkheid tussen de componenten.

In de literatuur wordt verslag gedaan van onderzoek dat is verricht naar de samenhang en de toepassingsmogelijkheden van de verschillende modellen. Gezien de opzet van beide modellen geeft het door Ascher en Feingold [1968] voorgestelde 'Bad as Old' model (een systeem is na reparatie van een defect weer even 'slecht' als juist daarvoor), vergeleken met een SRP met een toenemend aantal onderhoudsacties, een steeds grotere afwijking. Grigelionis [1964] heeft de condities onderzocht waarvoor een SRP convergeert naar een NHPP voor beperkte bedrijfstijd. Na verloop van tijd kan het gedrag van een repareerbaar systeem benaderd worden door een HPP, Drenick [1960], gedurende de eerste periode na ingebruikname is modellering door een NHPP meer waarschijnlijk.

Voortbouwend op het HPP en het NHPP, het RP en SRP zijn suggesties gedaan voor verbeterde modellen voor gedragsmodellering. In veel gevallen bestaan deze modellen uit een mengvorm van de beschreven basismodellen. Steeds is onderhoud niet als expliciete parameter herkenbaar of in te voeren. De grootse belemmering wordt veroorzaakt door de vereiste volledige onafhankelijkheid tussen de componenten van een systeem.

Paragraaf 3.2.3: Markov ketens.

A.A. Markov publiceerde in 1907 in het Russisch de naar hem genoemde theorie, opgesteld voor de mathematische beschrijving van opeenvolgende toestanden waarin een samengesteld systeem zich kan bevinden. Het doel van een Markovanalyse is de bepaling van de kans dat een systeem zich ten tijde t in een bepaalde toestand i bevindt, $P_i(t)$

Het gebruik van deze methode is wijdverbreid, toepassing als rekenmodel in de bedrijfszekerheid is slechts één van de mogelijkheden. Voor een algemene introductie van de Markovanalyse wordt bijvoorbeeld verwezen naar Langrock en Jahn [1979].

Als eerste fase in het gebruik van deze methode moeten de verschillende toestanden waarin een systeem zich kan bevinden worden gedefinieerd. In de bedrijfszekerheidstheorie zijn de te onderscheiden toestanden dikwijls direct gerelateerd aan de verschillende toestanden van de componenten binnen dat systeem. Daarom kan, althans voor systemen van geringe omvang, een complex onderhoudsconcept worden gemodelleerd. Voor grotere systemen neemt het aantal mogelijke toestanden zeer snel toe.

Vervolgens moeten de discrete of continue overgangskansen tussen elk van deze toestanden worden bepaald. Deze kunnen worden weergegeven in de zogenaamde overgangsmatrix, waarmee de analyse verder kan worden voortgezet.

Door een juiste definiëring van de verschillende systeemtoestanden kan een multi-state situatie worden gemodelleerd. De situatie waarin het wegvallen van redundantie (na falen) resulteert in een extra belasting van de resterende componenten, is eveneens eenvoudig te modelleren. Ook passieve redundantie kan worden weergegeven, waarbij de effecten van eventuele verborgen gebleven faalgebeurtenissen kunnen worden meegenomen. Een recente toelichting op de verschillende situaties is gegeven door Lewis [1987].

Een praktische beperking van de homogene Markovanalyse is het feit dat de kansovergangen tussen de verschillende toestanden (in de bedrijfszekerheid veelal het faal- en herstelgedrag), in de continue situatie meestal worden beperkt tot een modellering door de exponentiële verdeling. Het modelleren met andere verdelingen is minder gebruikelijk, maar niet onmogelijk. Belangrijke consequenties van het gebruik van inhomogene Markov ketens kunnen gevonden worden in het proefschrift van Seim [1968].

Een typisch toepassingsgebied is de bedrijfszekerheidsanalyse van elektrische systemen, bijvoorbeeld voor de modellering van stand-by schakelproblemen. De grafische weergave van de mogelijke systeemovergangen geeft een duidelijk inzicht in de onderlinge samenhang van het systeemgedrag.

Door de complexiteit van de onderhoudspraktijk, resulterend in een groot aantal te onderscheiden systeemtoestanden (afhankelijkheden), en door de voor het praktisch gebruik gelimiteerde mogelijkheden in de beschrijving van de toestandsovergangskansen, is de Markovanalyse slechts beperkt bruikbaar als model voor de beschrijving van het effect van onderhoud.

Paragraaf 3.3: Simulatie.

Een werkelijk optredend toevalsproces, zoals bijvoorbeeld het faalgedrag, kan worden geïmiteerd door een kunstmatig toevalsproces met dezelfde karakteristieken. Door combinatie van een random getal met de verdelingsfunctie van faal- en eventueel herstelgedrag kan het toevalskarakter van componentgedrag worden nagebootst. Een dergelijk proces heeft bekendheid gekregen onder de naam Monte Carlo simulatie (MCS).

Een systeemmodel kan worden opgebouwd uit componenten en hun onderlinge structuur. Door de functionele structuur van de componenten te modelleren kan de consequentie van het falen van een component op het systeemgedrag worden opge maakt. De gevolgen van met name structurele en, in beperkte mate, eveneens functionele afhankelijkheden kunnen worden onderkend, eventueel resulterend in een gezamenlijk (preventief) vervangen van niet gefaalde componenten. Zo kan, volledig los van een onderhoudsconcept, een model worden opgebouwd dat qua faal- en herstelgedrag overeenkomt met het te beschrijven systeem. Vervolgens kan, volledig expliciet, het onderhoudsconcept worden geformuleerd, gemodelleerd en toegepast. Onderhoud als expliciete parameter bevordert de herkenbaarheid en toegankelijkheid van het model en de rekenresultaten. De acceptatie in onderhoudskringen neemt hierdoor toe.

De mogelijkheden tot modellering zijn in een simulatiemodel in principe onbegrensd. Verregaande detaillering in zowel faal- als herstelgedrag, in onderlinge afhankelijkheden en in het onderhoudsconcept is mogelijk. Praktische grenzen worden gesteld door met name de (zeer beperkte) beschikbaarheid van de benodigde gegevens en in zekere mate door de benodigde simulatie (=computer-reken) tijd. Een universeel toepasbaar model, geschikt voor ieder systeemontwerp is denkbaar, doch vermoedelijk praktisch onuitvoerbaar. Het aantal invloedsfactoren is daarvoor te omvangrijk. De methode is echter betrekkelijk flexibel, waardoor aanpassing aan verschillende situaties mogelijk is.

In feite is een MCS geen rekenmethode welke, uitgaande van de exacte gegevens leidt tot *de* uitkomst, bijvoorbeeld het optimale onderhoudsconcept. Het systeemgedrag wordt niet weergegeven in een mathematisch gesloten vorm, toegankelijk voor optimalisatie-methoden. Een volledig gemodelleerde case wordt gesimuleerd met als (benaderende) uitkomst bijvoorbeeld een schatting voor de verwachting en de variantie van de (normaal verdeelde) onderhoudskosten. Door interpretatie van de deelresultaten, bijvoorbeeld het aandeel per component in de totaalkosten, kunnen de consequenties van het gekozen onderhoudsconcept worden geëvalueerd. Met deze informatie kan dan de volgende iteratieve stap in een optimalisatieproces worden gezet. In hoofdstuk 2 zijn een aantal belangrijke factoren voor de modellering van onderhoud naar voren gebracht, het overgrote deel hiervan kan worden gemodelleerd in een simulatiemodel.

Paragraaf 3.4: Methoden gericht op het onderhoudsmanagement.

Als reactie op de dikwijls teleurstellende resultaten van mathematische methoden bij de modellering van onderhoud en systeemgedrag, is een parallelontwikkeling gaande, specifiek gericht op ontwerp en optimalisatie van het onderhoudsconcept voor reparerbare systemen.

Analoog aan de in paragraaf 3.1 voorgestelde analysemethoden wordt een systematische aanpak gepropageerd. Met name het geplande preventieve onderhoud wordt gestructureerd en dient als basis voor het te ontwerpen onderhoudsconcept. Voorbeelden van deze methoden zijn geformuleerd door Kelly [1984] en Gits [1984,1987]. Beiden stellen een stapsgewijze ontwerpprocedure voor, waarin de volgende fasen te onderscheiden zijn:

- 1- Systeemanalyse.
- 2- Kwalificatie van elementair onderhoud.
- 3- Kwantificatie van elementair preventief onderhoud.
- 4- Kwantificatie van structureel afhankelijk preventief onderhoud.
- 5- Structureren van preventieve onderhoudsintervallen.
- 6- Structureren van de onderhoudsbehoefte.
- 7- Opstellen van het onderhoudsconcept.

Tussen beide methoden bestaat grote overeenkomst. Allereerst worden de systeemgrenzen afgebakend, binnen deze grenzen worden de relevante componenten geselecteerd. De elementaire onderhoudsregels worden gekwantificeerd en gerangschikt naar effectiviteit. Gits' methode is voor de clustering van planbaar preventief onderhoud in

detail uitgewerkt in stap 5. Structurele en (in mindere mate) economische afhankelijkheid worden onderkend en verwerkt. In het voorgestelde onderhoudsconcept kan bovendien rekening gehouden worden met de wenselijkheid van een regelmatig werkaanbod voor de onderhoudsdienst. Kelly licht de voorgestelde methode toe met een aantal voorbeelden; een illustratie van Gits' methode is te vinden in het eindstudieverlag van Lambooy [1987] of als uittreksel in een gezamenlijke publicatie van Lambooy en Gits [1987].

In elke praktijksituatie zal de voorgestelde regelmaat van het zo ontworpen onderhoudsconcept onderbroken worden door ongeplande, correctieve acties. Dit correctief onderhoud verstoort het geplande onderhoudsschema, maar creëert (ten minste lokaal) de gelegenheid tot ongepland preventief onderhoud: opportunistisch onderhoud. Deze mogelijkheden voor preventief onderhoud worden weliswaar onderkend, maar zijn ongebruikt gelaten in het opgestelde onderhoudsconcept.

In de publicaties van Gits is slechts weinig aandacht geschonken aan de feitelijke kwantificering van de elementaire onderhoudsregels, Geurts [1986] gaat dieper in op deze problematiek. Uit een dergelijke kwantificatie komt duidelijk naar voren dat zelfs wanneer een (tijdsafhankelijke) preventieve politiek zinvol toegepast kan worden, slechts een deel van de correctieve acties te voorkomen is, zie ook hoofdstuk 5. Falen van een component of van een systeem kan door geen enkel (praktisch zinvol) onderhoudsconcept geheel worden voorkomen. In veel situaties zijn deze correctieve, ongeplande acties belangrijker dan de preventieve, geplande stops, soms door hun frequentie, bijna altijd omdat de ermee gemoeide kosten hoger zijn.

Een belangrijke hiaat is bovendien dat Gits noch Kelly aangeven hoe het effect van het ontworpen onderhoudsconcept nader te kwantificeren is, noch in termen van (verbeterd) systeemgedrag, noch in termen van (potentiële) kostenbesparingen.

Een enigszins buiten het kader van dit overzicht vallende categorie onderhoudsmodellen wordt gevormd door de methoden *direct* gericht op het ondersteunen van de te nemen beslissingen in de onderhoudsuitvoering. Zoals gesteld, komt de economische afhankelijkheid (paragraaf 2.3.2) in een praktijksituatie zeer veel voor, resulterend in gelegenhedaafhankelijk, ofwel opportunistisch onderhoud.

Een op deze praktijk afgestemde recente ontwikkeling is te vinden in de ontwikkeling van het PROMPT softwarepakket (Probabilistic Ranking Opportunity Maintenance Planning Technique) ontwikkeld bij Shell Research B.V. door Dekker e.a., zie Van Aken [1984]. Op basis van de in de faalverdelingen opgeslagen historische informatie en de momentane standtijden van de componenten in het systeemmodel, ondersteunt de methode op kwantitatieve wijze de te nemen beslissing tot het uitvoeren van opportunistisch, gebruiksafhankelijk onderhoud. Het adviseert welk onderhoudspakket bij voor-

keur nu moet worden uitgevoerd, gegeven de gelegenheid, en welk pakket uitgesteld kan worden tot later. De eerste versie stelde een optimale bedrijfszekerheid primair, de tweede versie heeft als doelstelling minimale (totale) onderhoudskosten, uiteraard op langere termijn. Met de laatste doelstelling wordt voorkomen dat de methode teveel preventief onderhoud zal adviseren. De methode is ontwikkeld voor gebruik op een PC.

Ondanks belangrijke vereenvoudigingen in modellering lijkt de methode zeer bruikbare resultaten op te leveren; geclaimd wordt dat in een 'offshore' situatie over een tweejarige testperiode een reductie in de onderhoudskosten van 30-50 % is bereikt, zonder significante vermindering in de beschikbaarheid van het systeem, Van Rijn [1987]. Beperkingen zijn onder andere het feit dat de (momentane) informatie afkomstig van inspectie en conditiebewaking niet verrekend kan worden. Het model hanteert het 'opportunity-based block replacement' model, waarbij op slechts basis van de verstreken kalendertijd besloten wordt tot een preventieve actie. Verder wordt verondersteld dat de 'opportunities' onafhankelijk zijn van het uitgevoerde onderhoud, bijvoorbeeld omdat de aanleiding tot de gelegenheid buiten de systeemgrenzen ligt, of omdat het uitgevoerde onderhoud in relatie tot de systeemomvang zeer gering is, zie Dekker en Smeitink¹.

Naast de gebruikelijke gegevens over onder andere de systeemstructuur en het faal- en herstelgedrag van de componenten, moet tevens informatie beschikbaar zijn over de momentane leeftijd van alle componenten: het model moet parallel functioneren aan het systeem. Indien aan deze voorwaarde kan worden voldaan (on line?), is een dergelijke methode zeker als zinvol gereedschap te beschouwen, behulpzaam bij de directe uitvoerings- en registratieproblematiek van de onderhoudsdiensten.

Paragraaf 3.5: Conclusies.

Voor de modellering van onderhoud als invloedsfactor op het gedrag van repareerbare systemen lijken een aantal methoden beschikbaar. De te stellen eisen en wensen aan een dergelijke methode zijn echter legio, zie paragraaf 2.7. Om de invloed van een gekozen onderhoudsconcept tot uitdrukking te kunnen brengen moet de (combinatorische) methode systeemgedrag kunnen afleiden uit het faal- en eventueel herstelgedrag van de samenstellende componenten.

Enkele van de in dit hoofdstuk toegelichte methoden beogen slechts een inventarisatie van bijvoorbeeld de onderhoudskosten, of het structureren van het vooraf bekende preventieve onderhoud. In een modellering van het resulterende systeemgedrag, het enige

¹ R. Dekker en E. Smeitink. K.S.L.A. Amsterdam. Titel: Opportunity based block replacement. Aangeboden aan: European Journal of Operational Research, vermoedelijke publicatiedatum 1989/1990.

criterium waaraan de invloed van het voorgestelde onderhoudsconcept kan worden getoetst, is niet voorzien.

De analytische / mathematische aanpak impliceert telkens één of meer van de volgende, voor de modellering van (het effect van) onderhoud verstrekkende veronderstellingen:

- de onderlinge afhankelijkheden tussen de componenten worden niet of slechts gedeeltelijk gemodelleerd,
- het onderhoudsconcept is sterk gestyleerd, vaak tot het gebruik van één enkele, dikwijls gebruiksaafhankelijke politiek,
- faal- en herstelgedrag van de componenten worden gemodelleerd als een toevallig proces, beschreven door de exponentiële verdeling,
- het aantal componenten is sterk beperkt,

Deze beperkingen hebben als consequentie dat praktisch gezien alleen de meest eenvoudige situaties analytisch kunnen worden doorgerekend; een probleem blijkt al snel te complex. De vooralsnog enige geschikte methode is gevonden in de Monte Carlo Simulatie. De meeste van de in hoofdstuk 2 genoemde invloedsfactoren kunnen ten minste in principe worden gemodelleerd. Bovendien is in deze methode onderhoud als expliciete parameter op te nemen. In het volgende hoofdstuk zal het ontwikkelde onderhouds-simulatiemodel worden gepresenteerd.

4 SIMULATIEMETHODE EN ONDERHOUDSMODEL

In de eerste paragrafen 4.1 en 4.2 van dit hoofdstuk wordt ingegaan op het principe van de geselecteerde rekenmethode: Monte Carlo simulatie. Het opgestelde algoritme voor simulatie van het tijdsafhankelijke systeemgedrag wordt toegelicht. Paragraaf 4.3 handelt over de relatieve inefficiëntie van de methode en de daaruit voortkomende praktische beperking in rekennauwkeurigheid. De introductie van het ontwikkelde model, opgesplitst in modellering van het systeem en modellering van het onderhoud is onderwerp van de paragrafen 4.4 respectievelijk 4.5. Paragraaf 4.6 voorziet in een korte toelichting op het geformuleerde financiële model. Het in de volgende paragrafen enigszins fragmentarisch gepresenteerde model zal in paragraaf 4.7 in de uiteindelijk geprogrammeerde vorm belicht worden. Aan het probleem van de validatie van het opgestelde model wordt in paragraaf 4.8 aandacht geschonken.

Paragraaf 4.1: Monte Carlo simulatie.

In hoofdstuk 3 is geconcludeerd dat bij de praktijk aansluitende berekeningen slechts mogelijk zijn door het faal- en herstelgedrag van repareerbare systemen te simuleren. Ondanks de in het vorige hoofdstuk genoemde voordelen bestaat tegen simulatie als rekenmethode dikwijls enige reserve. De aanpak wordt beschouwd als het laatste redmiddel in systeemanalyse, waarvan toepassing slechts geoorloofd is als oplossing langs analytische weg onmogelijk blijkt.

Dergelijke kritiek op de methode getuigt van een ongenueanceerde opstelling. De dikwijls naar voren gebrachte inefficiëntie van de methode, als gevolg van de trage convergentie van de aan spreiding onderhevige rekenresultaten, resulteert weliswaar in een fors gebruik van rekentijd, maar kan door de sterk afgenomen rekenkosten niet meer als een belangrijk bezwaar worden gezien. Gezien de beperkte beschikbaarheid van de benodigde (faal-) gegevens en de daaruit voortkomende onzekerheid in de kwantificering van de gedragsparameters vormt de praktisch gelimiteerde nauwkeurigheid van de methode geen reëel bezwaar. Bovendien is een alternatief dikwijls niet voorhanden.

Al in 1954 wordt een 'Symposium on Monte Carlo Methods' gehouden en in datzelfde jaar publiceert Kahn de resultaten van een studie over de toepassingsmogelijkheden

van simulatie. In 1958 beschrijft Firstman van een aantal gevallen waarin door simulatie analytisch onoplosbare bedrijfszekerheidsproblemen konden worden geanalyseerd. In een computersimulatie kan, vollediger dan in een theoretisch model, een theorie in zijn totale complexiteit beschreven worden. In het hier relevante vakgebied zijn vooral beschikbaarheidsvraagstukken door simulatie inzichtelijk te maken.

Zelfs als een analytische oplossing haalbaar is, kan simulatie een aantrekkelijk, tijdbesparend alternatief zijn. Zo kan in een oriënterend onderzoek het effect van een wijziging in de basisstelling van een model relatief eenvoudig worden onderzocht door simulatie, terwijl in zo'n geval analytisch een volledig nieuwe berekening moet worden voltooid. Voor de analyse van detailwijzigingen is simulatie misschien minder geschikt, daar de resulterende effecten verloren kunnen gaan in de spreiding van uitkomsten, eigen aan de methode, maar zeker ook eigen aan het feitelijke systeemgedrag. Men kan zich echter afvragen of dit een praktisch relevant bezwaar is voor de hier aan de orde zijnde materie, waar gegevens dikwijls minimaal voorhanden zijn.

De mogelijkheid tot verregaande detaillering van het model werkt soms als nadeel. Het steeds opnieuw verfraaien en verfijnen van een model is dermate eenvoudig (en ook leuk!) dat dit de oorspronkelijke, praktische doelstelling kan doen vervagen. Niet alleen de modelmaker/programmeur kan voor de verleiding bezwijken, ook een opdrachtgever kan te ver gaan in de gevraagde detaillering. Alleen met een duidelijk doel voor ogen en voldoende zelfdiscipline kan voorkomen worden dat een project eindeloos wordt uitgebreid, zie ook Lehman [1977].

Een ander nadeel is verwoord door Dutton en Starbuck [1971]. Zij wijzen met nadruk op de paradox van Bonini, die een waarschuwing inhoudt voor vooral zeer complexe modellen:

"A model is built in order to achieve understanding of an observed causal process, and the model is stated as a simulation program in order that the assumptions and functional relations may be as complex and realistic as possible. The resulting program produces outputs resembling those observed in the real world, and inspires confidence that the real causal process has been accurately represented. However, because the assumptions incorporated in the model are complex and their mutual interdependencies are obscure, the simulation program is no easier to understand than the real process was".

De functionele verbanden in het gemodelleerde proces kunnen soms zeer moeilijk uit de resultaten te achterhalen zijn. Dit is een nadeel dat in veel mindere mate opgaat voor een analytische benadering, ook als deze numeriek verkregen moet worden. Een duidelijk voordeel van een analytische benadering is dat de gangbare mathematische optimaliseringstechnieken en gevoeligheidsanalyses toepasbaar zijn. Dit in tegenstelling tot de veel meer ad hoc gezochte oplossingen welke in combinatie met simulatie gebruikelijk zijn. Voor de optimalisatieproblematiek reikt Kleijnen in verschillende publicaties [1977,1987] meer gestructureerde (regressie)methoden aan, voor gebruik in combinatie met simulatie als rekenmethode.

In veel standaardwerken over bedrijfszekerheid wordt simulatie als rekenmethode slechts terloops genoemd. Recente verhandelingen over het gebruik en de techniek van simulatie in uiteenlopende toepassingen zijn geschreven door Martin [1968], Lehman [1977], Rubinstein [1981] en recentelijk door Kleijnen [1987].

De Monte Carlo Simulatie (MCS) steunt op het genereren van toevalsgetallen en daarom is de methode vernoemd naar het beroemde casino. Het theorema van Glivenko-Cantelli vormt de basis van simulatie, zie Rohatgi [1976]: als F_n^* de empirische verdeling van de steekproef $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ uit een populatie met verdeling F is, dan geldt dat $F_n^*(x)$ uniform naar $F(x)$ convergeert, d.w.z. voor $n \rightarrow \infty$ geldt voor elke positieve ϵ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \sup \left| F_n^*(x) - F(x) \right| > \epsilon \right\} = 0 \quad (-\infty < x < \infty) \quad (4.1)$$

Guérard [1977] verwoordt het theorema als volgt: als Z een gegeven functie van toevalsvariabelen $Z = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ is, waarin elke variabele X_i kan worden gekarakteriseerd door een kansverdeling, dan kan met uit iedere verdeling aselekt getrokken waarden van X_i de corresponderende Z berekend worden. De ware verdeling van Z kan (voor $n \rightarrow \infty$) willekeurig dicht benaderd worden.

In een simulatie worden stochastische grootheden gekwantificeerd door het combineren van een (groot) aantal aselectie trekkingen uit kansverdelingen. Dergelijke aselectie trekkingen kunnen in een computerprogramma zonder problemen uit een breed scala van

verdelingen worden gerealiseerd door het aanroepen van standaard routines uit een veelheid van statistische pakketten, bijvoorbeeld ISML¹ en NAG².

Onafhankelijk van een dergelijk pakket kan een aselechte trekking worden verkregen door combinatie van een random getal met de betreffende (faal-)verdeling. Als U_1 een willekeurig getal is uit een uniforme verdeling, met waarden tussen (0,1) en $F(t)$ is de desbetreffende kansverdeling, dan kan in beginsel uit de formule:

$$F(t_1) = \int_0^{t_1} f(t) dt = U_1 \quad (4.2)$$

een waarde voor t_1 worden berekend, als aselechte trekking uit de beschouwde verdeling $F(t)$. Dit kan bijvoorbeeld een standtijd van een component voorstellen, opgemaakt uit de faalverdeling. De Weibullverdeling bijvoorbeeld kan worden omgerekend tot:

$$t = \gamma + (\eta - \gamma) [\ln\{R(t)\}]^{1/\beta} \quad (4.3)$$

Van vele verdelingen is de $F(t)$ niet in mathematisch gesloten vorm beschikbaar; directe omrekening uit de faalkans is dan niet mogelijk. Meestal zijn echter vervangende algoritmen beschikbaar. Een aselechte trekking uit de normale verdeling bijvoorbeeld kan worden gerealiseerd door twee (pseudo)random getallen u en v uit het interval [0,1) te combineren volgens $t_1 = \sqrt{-2\ln(u)} \cdot \sin(2\pi v)$. Box en Muller [1958] beschrijven een efficiënt algoritme.

Van de standaardroutines voor aselechte trekkingen mag verwacht worden dat het rekentechnisch efficiënte algoritmen zijn. Indien beschikbaar, heeft het gebruik ervan in het algemeen de voorkeur boven het zelf programmeren. Zo is ook een random generator in veruit de meeste gevallen beschikbaar. Eventueel zijn voor de generatie van 'pseudo'-random getallen diverse algoritmen bekend. Als literatuur voor aselechte trekkingsalgoritmen en pseudorandom procedures kan verwezen worden naar Van Putten en Van der Tweel [1979] of naar Newman en Odell [1971].

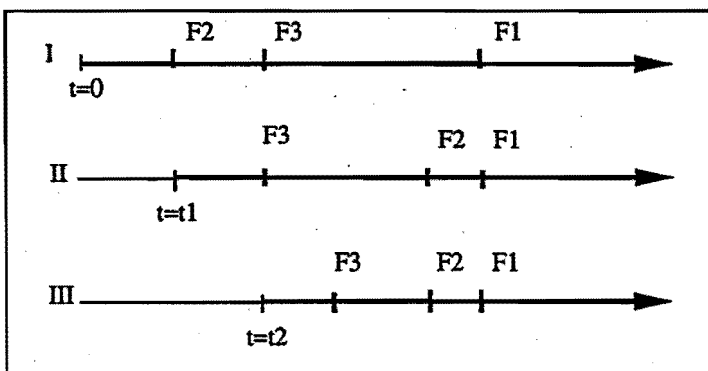
¹ International Mathematical & Statistical Libraries, ISML Inc. Houston, Texas, USA. TUE-RC informatie AG-55.

²NAG Fortran Library, Mini Manual, TUE-RC-Informatie AG-61.

Paragraaf 4.2: Simulatiemodel voor het systeemgedrag.

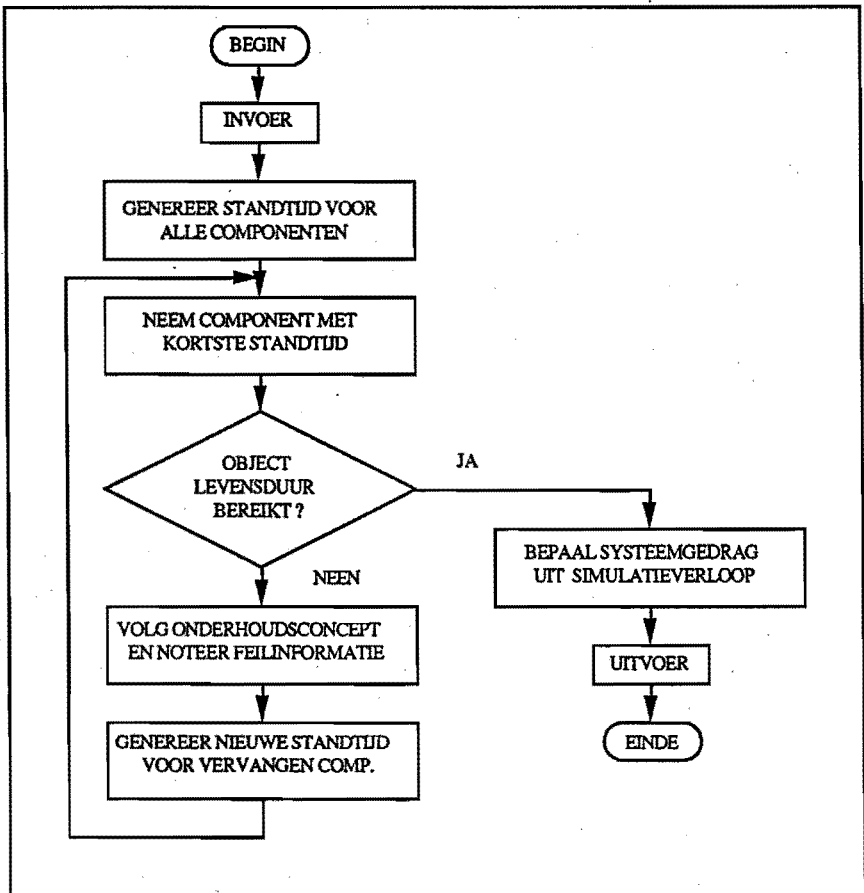
De regel van Glivenko-Cantelli geeft het simulatieprincipe aan. In paragraaf 3.2 is vermeld dat het te beschrijven systeemgedrag als instationair moet worden beschouwd, want gedurende de totale levensduur is het gedragpatroon naar alle waarschijnlijkheid aan verandering onderhevig. Daarom kan niet worden volstaan met het simuleren en combineren van random verspreide momentopnamen. Voor een correcte beschrijving van het systeemgedrag zal de volledige levensduur van een systeem chronologisch gesimuleerd moeten worden.

Sterk vereenvoudigd, zonder enige vorm van preventief onderhoud, verloopt de simulatie als volgt. Van iedere component wordt uit de bijbehorende faalverdeling aselekt een standtijd gegenereerd; op dit moment is voor de betreffende component correctief onderhoud noodzakelijk. De tijdstippen worden gerangschikt in een oplopende reeks. Vervolgens wordt een begin gemaakt met de simulatie van het systeemgedrag. Tot aan het eerst optredende defect wordt geen onderhoudsactie geconstateerd; in de simulatie wordt een stap in de tijd gezet, tot aan deze eerste onderhoudsactie. De consequenties van het falen van de desbetreffende component voor het functioneren van het systeem worden bepaald. Dit kan bijvoorbeeld het verlies van (een deel van) de productiecapaciteit zijn. Dan wordt de defecte component vervangen, waarbij uit de desbetreffende verdeling een hersteltijd bepaald wordt. Voor de nieuwe component wordt wederom aselekt een standtijd bepaald. Deze wordt op de juiste plaats ingevoerd in de reeks en de volgende stap in de simulatie van de levensduur kan worden gezet, zie figuur 4.1.



Figuur 4.1: Stapsgewijze simulatie van het systeemgedrag, F_x is het voor component x gesimuleerde faalmoment.

Bij het bereiken van de volgende aktie wordt de procedure herhaald. Het proces wordt voortgezet tot het einde van de opgegeven levensduur is bereikt en uit het simulatieverloop wordt het systeemgedrag bepaald; er is dan één run voltooid. Het vereenvoudigde algoritme voor de simulatie van één run is afgebeeld in figuur 4.2.



Figuur 4.2 : Het vereenvoudigd simulatiealgoritme.

Het totale gedragspatroon, verkregen na één keer doorlopen van de levensduur, levert een onnauwkeurige schatting van het systeemgedrag. Het is slechts één van de mogelijke realisaties. Dit is het gevolg van het stochastische karakter van de in de simulatie verwerkte gegevens. Nauwkeuriger resultaten worden verkregen door een (groot) aantal runs te simuleren en de resultaten van alle runs te combineren tot het eindresultaat. De uitkomst van één run is te beschouwen als een aselechte trekking en de combinatie van

een aantal onderling onafhankelijke runs als een aselechte steekproef. Samen vormen zij één volledige simulatie.

De uitkomst van een simulatie, zoals het systeemgedrag uitgedrukt in een aantal kengetallen en de onderhoudskosten, zijn opnieuw stochastische grootheden, te beschrijven met een kansverdeling. Volgens de wet van de grote aantallen convergeert het gemiddelde van een reeks van onderling onafhankelijke X_1, X_2, \dots, X_n voor grote n naar de verwachtingwaarde μ .

De simulatie moet zo worden ingericht dat de runs onderling onafhankelijk zijn, zodat de verwachtingswaarde kan worden benaderd door de resultaten van de runs te middelen. De bijbehorende spreiding in de runresultaten kan eveneens een belangrijk gegeven zijn. Het is een eigenschap van het gemodelleerde systeem en is belangrijk voor bijvoorbeeld de budgettering of voor het afsluiten van een onderhoudscontract, als daarvoor een richtbedrag genoemd moet worden. Ook de nauwkeurigheid van het eindresultaat is afhankelijk van de spreiding in de runresultaten, zoals wordt toegelicht in de volgende paragraaf.

Paragraaf 4.3: Nauwkeurigheid en aantal runs.

MCS is inefficiënt in het gebruik van rekentijd. Er kan worden aangetoond dat de nauwkeurigheid van het gemiddelde resultaat evenredig is met de wortel uit het aantal runs. Dit heeft als gevolg dat een grote nauwkeurigheid pas kan worden bereikt door de resultaten van een (veelal groot) aantal runs te combineren. Dit vraagt om een zo efficiënt mogelijke opzet van het rekenmodel. De methode moet echter ook de mogelijkheid bieden het gemodelleerde proces stapsgewijs te volgen (en te verifiëren!). In de opzet van het model is aan dit laatste een hoge prioriteit toegekend. Het gesimuleerde onderhoud moet herkenbaar worden weergegeven, eventueel ten koste van een efficiënte simulatie.

Als antwoord op de veelvuldig becommentariëerde inefficiëntie van MCS zijn de zogenaamde Variantie Reducerende Technieken (VRT) ontwikkeld. Hiermee kan, althans voor eenvoudige, inzichtelijke systemen, de efficiëntie van een MCS worden verbeterd. Door gebruik te maken van a priori bekende informatie in de selectie van de doorgerekende combinaties van toevalsgrootheden, is een verbetering van de efficiëntie mogelijk. Kleijnen [o.a. in 1971] en in beperkte mate Guérard [1977] geven een overzicht van de mogelijkheden. Watanabe [1986] schetst de fundamentele mathematische

theorie achter de VRT en doet voorstellen voor toepassing op meer complexe, multistate modellen.

In het algemeen moet geconcludeerd worden dat complexe systemen, met onder andere een grote verscheidenheid aan afhankelijkheden tussen de componenten, minder toegankelijk zijn voor een dergelijke aanpak. Dit ondanks het feit dat de potentiële verdiensten vaak zeer uitnodigend zijn. Bovendien geldt dat de door de rekenmethode veroorzaakte spreiding in de resultaten in een aantal gevallen klein is vergeleken met het onderzochte systematische effect, waardoor de situatie ontstaat dat, althans in de oriënterende fase, met relatief weinig runs kan worden volstaan. In dit eerste ontwerp van het onderhoudsmodel zal dan ook niet van de (eventuele) mogelijkheden van deze technieken gebruik worden gemaakt.

De nauwkeurigheid van een simulatieresultaat is afhankelijk van twee factoren: het aantal runs en de spreiding in de desbetreffende resultaten van elke run. Zoals al eerder werd opgemerkt, zijn de resultaten van een simulatie opnieuw stochastisch en te beschrijven door kansverdelingen. Een kansverdeling van de som van onderling onafhankelijke stochastische grootheden kan zeer verscheiden en zeer ingewikkeld zijn, zowel symmetrisch als asymmetrisch.

Voor het schatten en toetsen van het gemiddelde van (asymmetrische) verdelingen wordt de in veel publicaties de als robuust omschreven klassieke Student-t toets aanbevolen. Kleijnen [1984] vergelijkt deze t-toets met twee varianten van de door Johnson [1978] gemodificeerde t-toets en de Wilcoxon Signed Rank toets. Hij komt daarbij tot de conclusie dat voor een symmetrische populatie de verschillende toetsen alle voldoen. Voor de asymmetrische situatie is één van de gemodificeerde t-toetsen als betere methode te beschouwen, althans voor het toetsen van de ligging van de verwachtingswaarde van de verdeling. Johnson [1978] onderkent echter dat uit de voorgestelde methode niet direkt een uitdrukking is af te leiden voor de bepaling van een betrouwbaarheidsinterval.

De Centrale limietstelling (CLS) leert evenwel dat als X_1, X_2, \dots, X_n onderling onafhankelijke stochastische grootheden zijn met dezelfde kansverdeling en als de verwachting van $X_j = \mu$, voor $j=1, \dots, n$ en de variantie van $X_j = \sigma^2$, geldt:

$$\lim P\left(\frac{X_1 + \dots + X_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \leq z\right) = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (4.6)$$

De betekenis van de CLS is dat de samenstelling van deze kansverdelingen kan worden benaderd met één kansverdeling: de normale verdeling.

Voor de bepaling van het betrouwbaarheidsinterval voor μ , wordt gekozen voor het gebruik van de klassieke Student-t methode. De theorie hierover is in veel statistische leerboeken opgenomen; voor een eenvoudige, Nederlandstalige uitleg wordt verwezen naar Wijvekate [1986]. Deze uitgave bevat tevens de van toepassing zijnde tabellen. Voor de statistisch minder ingewijden volgt hieronder een korte toelichting.

Toegepast op de (onderling onafhankelijke) resultaten per run, zoals bijvoorbeeld de totale onderhoudskosten, kan het geldende betrouwbaarheidsinterval rond de verwachtingswaarde, ofwel de bereikte nauwkeurigheid bepaald worden. Met het betrouwbaarheidsinterval van een onbekende parameter wordt de verzameling van alle parameterwaarden aangeduid, die op grond van een waargenomen steekproef met een gegeven toets niet mogen worden verworpen. Voor de toets geldt α als de onbetrouwbaarheid. Traditionele waarden hiervoor zijn $\alpha=0.05$ of $\alpha=0.1$. Uit een steekproef is een betrouwbaarheidsinterval voor de verwachting μ af te leiden: uitgaande van een normale verdeling (CLS) geldt:

$$\bar{x} - s t_{\alpha/2} / \sqrt{n} < \mu < \bar{x} + s t_{\alpha/2} / \sqrt{n} \quad (4.7)$$

- Met hierin: n = aantal waarnemingen in de steekproef.
 \bar{x} = steekproefgemiddelde.
 s = standaardafwijking van de steekproef.
 μ = verwachtingswaarde.
 $\alpha/2$ = eenzijdige overschrijdingskans.
 t = excentriciteit van de t-verdeling.

De standaardafwijking van de steekproef kan worden berekend met de formule:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2 / n}{n-1}} \quad (4.8)$$

In formule 4.7 is de excentriciteit, uitgedrukt in t , afhankelijk van het aantal vrijheidsgraden, in dit geval gelijk aan $(n-1)$. Deze t-verdeling is voor de verschillende steekproefgroottes tot $n = 120$ getabelleerd; daarboven geldt dat de excentriciteit van de normale verdeling toegepast mag worden. In de praktijk bestaat er al vanaf $n = 30$ weinig verschil meer in de excentriciteit van de beide verdelingen.

Voor $n > 30$ kan dan ook voor het berekenen van het betrouwbaarheidsinterval worden volstaan met de (benaderende) formule:

$$\bar{x} - s u_{\alpha/2} / \sqrt{n} < \mu < \bar{x} + s u_{\alpha/2} / \sqrt{n} \quad (4.9)$$

Daarin is : s = standaardafwijking van de steekproef ($n > 30$).
 u = excentriciteit van de normale verdeling.

Een simulatie kan een breed scala relevante deel- en tussenresultaten verschaffen, zoals per component een rapportage over het aantal vervangingen en de reden daarvan, of over de gesimuleerde bijdrage in de totaalkosten. Hiermee kan onder andere inzicht worden verkregen in het systeemgedrag onder het aangenomen onderhoudsconcept. Dergelijke deelresultaten zijn per run natuurlijk eveneens onderhevig aan een zekere spreiding en in principe kan volgens bovenstaande methode aan elk van deze resultaten een betrouwbaarheidsinterval worden toegekend. Indien ook op dit niveau hoge nauwkeurigheden worden vereist is, door de normalerwijze grotere spreiding in de deelresultaten, een (veel) groter aantal runs noodzakelijk.

Volgens bovenstaande methode kan ook tijdens een simulatie bepaald worden wanneer voldoende runs gerealiseerd zijn om te kunnen voldoen aan de gevraagde nauwkeurigheid in het resultaat. De simulatie kan dan worden afgerond en de einduitkomsten kunnen worden bepaald. Een dergelijke procedure is Steins two-stage procedure (double sampling). Uit de resultaten van de eerste n runs wordt het gemiddelde en de spreiding opgemaakt (first stage), waarna in één stap het aantal te simuleren runs wordt bepaald (second stage), zie o.a. Lehman [1977]. Kleijnen [1987] merkt op dat ervaring leert dat, voor een voldoende groot aantal runs, ook na iedere voltooide run met de tot dan toe verkregen resultaten berekend mag worden of de vereiste nauwkeurigheid is bereikt (sequential approach). Een minimum aantal waarnemingen is daarbij een vereiste; een richtgetal voor praktijkgebruik is circa. 30. In de simulatiepraktijk wordt meestal een mengvorm van beide methoden toegepast (multistage approach), waarbij s telkens nadat een aantal runs is voltooid opnieuw bepaald wordt. Kleijnen verricht onderzoek naar de effectiviteit en toepasbaarheid van de verschillende afbreekmethoden.

De benodigde rekentijd is (vrijwel) recht evenredig met het aantal te simuleren runs en is daarmee sterk afhankelijk van de vereiste nauwkeurigheid in de rekenresultaten. De rekentijd per run is afhankelijk van het totaal aantal te simuleren onderhoudsacties en hun

complexiteit. Over de benodigde rekentijd is in zijn algemeenheid geen uitspraak te doen. Als richtlijn kan worden aangehouden dat voor het ontwikkelde simulatiemodel de rekentijd voor een complex systeem (200 componenten) al snel in de orde van enkele tientallen minuten zal zijn (systeem VAX-2000). Daarbij is dan wel een ingewikkeld onderhoudsconcept gesimuleerd en wordt voldaan aan betrekkelijk hoge nauwkeurigheidseisen (betrouwbaarheidsinterval plus/min 1 % nauwkeurig, met 95 % zekerheid) in het eindresultaat van de simulatie, de totale onderhoudskosten.

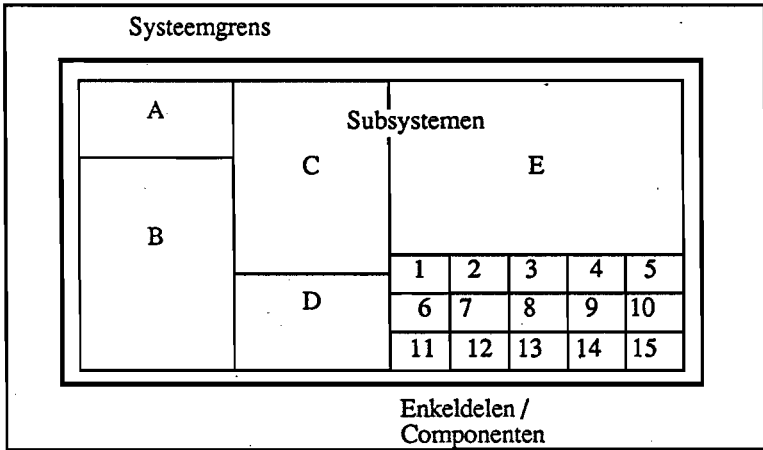
Paragraaf 4.4: Systeemmodellering.

De modellering van een systeem bestaat in eerste instantie uit het bepalen van de systeemgrenzen. Daarna dient de gewenste mate van detaillering van het systeem bepaald te worden, resulterend in de uiteindelijke componentkeuze. Vervolgens moeten de materiële en functionele afhankelijkheden tussen de gekozen componenten worden gemodelleerd, volgens de structuur die binnen het systeem bestaat. Voor de modellering van met name het faal- en herstelgedrag van de componenten wordt deels terugverwezen naar paragraaf 2.4. De kwantitatieve invulling is onderwerp van hoofdstuk 5.

Paragraaf 4.4.1: Systeemgrens en componentkeuze.

De eerste fase in de modellering van een systeem moet bestaan uit het afbakenen van de systeemgrenzen. De aangenomen systeemgrenzen bestaan meestal uit eenduidige, fysieke grenzen, bepaald door de te analyseren probleemstelling. De volgende fase bestaat uit het opdelen van het systeem in subsystemen en delen daarvan, waarbij de doelstelling van de analyse de detaillering van het model bepaalt.

Voor iedere vorm van systeemanalyse zijn deze fasen van afbakening en componentkeuze bijzonder belangrijk. Daarmee wordt bepaald wat de omvang van de werkzaamheden zal zijn, maar ook welke informatie nodig is om het zo geformuleerde model van gegevens te voorzien. Zonder de praktische gevolgen in ogenschouw te nemen kan naar voren gebracht worden dat theoretisch een model alleen dan volledig correct kan zijn indien het de kleinst actieve mechanismen omvat (denk aan weersvoorspellingen!). Zo kan de opsplitsing van een systeem (theoretisch) worden voortgezet tot op het niveau van de enkeldelen, zie over dit onderwerp onder andere Vesely [1981]. De gedetailleerdheid van de beschikbare informatie beperkt meestal in hoge mate de (maximale) gedetailleerdheid van het model. Met dit gegeven als uitgangspunt is vooraf een inventarisatie betreffende de haalbaarheid van de gevraagde analyseresultaten aan te bevelen.



Figuur 4.3: Systeembegrenzing en opdeling (bron: Vesely 1981).

In beginsel kunnen alle onderdelen van een samengesteld systeem als component in het model worden opgenomen. Het is echter praktisch de keuze te beperken tot de onderdelen die (naar verwachting) een relevant aandeel hebben in het onderhoud, in kosten en/of in frequentie, afhankelijk van de gevraagde resultaten.

In een onderhoudsgedragsmodel zullen de componenten de kleinste als eenheid te vervangen samenstellingen (onderhoudsmodules, least replaceable assemblies) voorstellen. Daarmee kan de feitelijke omvang van een component voor de verschillende toepassingen zeer uiteenlopen, onder andere afhankelijk van de gekozen systeemgrenzen. In de analyse van het onderhoudsgedrag van een dieselmotor bijvoorbeeld, zal de brandstofpomp in het algemeen als één enkele component gemodelleerd worden; een defecte pomp wordt immers in zijn geheel vervangen. De fabrikant van de brandstofpomp zal echter geïnteresseerd zijn in de pomp als systeem, met als componenten de onderdelen als nokkenas, plunjers, kleppen, etc.

Paragraaf 4.4.2: Materiële en functionele structuur.

De onderdelen van een systeem zijn ondergebracht volgens de *materiële structuur*; de wijze waarop zij ruimtelijk zijn samengebouwd. Met de *functionele structuur* wordt bedoeld het geheel van relaties tussen de onderdelen in het systeem; één aspect daarvan is de faalstructuur, die bepaalt in hoeverre falen van één of meer componenten leidt tot falen van het systeem, zie onder andere Van der Mooren [1983]. Beide structuurvormen tezamen geven inzicht in de relaties die gelden voor het te modelleren systeem. Zoals

aangegeven, representeren de componenten in een model in het algemeen concrete onderdelen van het systeem. In het model betekent dit dat de materiële en functionele relaties als afhankelijkheden tussen de componenten dienen te worden opgenomen. De hier gemodelleerde afhankelijkheden tussen onderdelen c.q. componenten zijn altijd geldig, onafhankelijk van het te kiezen onderhoudsconcept.

De materiële structuur kan leiden tot volgschade en/of volgherstel. Indien falen van een onderdeel betekent dat één of meer andere onderdelen zodanig beschadigd worden dat vervanging noodzakelijk is, dan moet een volgschaderelatie tussen de relevante componenten in het model worden opgenomen. De bij volgschade betrokken componenten worden altijd tezamen met de storing veroorzakende component vervangen. Volgschade leidt zodoende tot *onvoorwaardelijk volgherstel*. Van deze vorm van volgherstel is eveneens sprake indien een niet defecte of onbeschadigde component om andere redenen tegelijk met de gefaalde component moet worden vervangen, bijvoorbeeld vanwege de bereikbaarheid (pakkingen e.d.).

De modellering van onvoorwaardelijk volgherstel is eenvoudig: aan iedere component X kunnen één of meer componenten worden toegevoegd welke tegelijk met component X worden vernieuwd. De gegevens van alle vervangen componenten worden verwerkt, elk van de componenten wordt als nieuw beschouwd en aan elk van hen wordt een nieuw te simuleren standtijd toegekend. Een eenzijdige relatie in afhankelijkheid is mogelijk; in geval van wederkerigheid is er sprake van een onderhoudsmoduul. Het gemodelleerde volgherstel kan verschillen voor een correctieve of een preventieve onderhoudsacties aan component X, met name door verschil in *volgschade*.

Structurele afhankelijkheid (paragraaf 2.3.2) kan op deze wijze exact worden gemodelleerd en in beperkte mate is ook het effect van functionele afhankelijkheid na te bootsen.

De faalstructuur wordt weergegeven door het in serie- of parallelschakeling opnemen van componenten. Indien voor elke component geldt dat zijn falen onvoorwaardelijk leidt tot uitval van het systeem, dan wordt als faalstructuur een serieschakeling gemodelleerd. In werktuigen geldt voor de meeste onderdelen dat hun functievervulling onmisbaar is voor het functioneren van het systeem; de serieschakeling van componenten is voor deze categorie zeer gebruikelijk. Indien de (deel)functie welke voor het functioneren van het systeem noodzakelijk is door meer dan één component elk afzonderlijk kan worden vervuld, dan is de functionele structuur de parallelschakeling.

Functieverlies van één of meer componenten heeft geen uitval van het systeem tot gevolg, zolang als kan worden voldaan aan de (deel)functie vervulling door de resterende component(en). Dit is redundantie of overtaligheid.

In de modellering van het (tijdsafhankelijke) faalgedrag is het van belang of de apparatuur in stand-by positie buiten bedrijf is of continu functioneert; dit is koude, respectievelijk warme redundantie. Koude redundantie geeft een opstart risico (o.a. als gevolg van hidden failures), bij warme redundantie gaat het eventuele slijtageproces voort. Strikt genomen zal een onbelaste of onder deelbelasting functionerende, warm redundante component in veel gevallen een afwijkend faalgedrag vertonen. Dit effect zal niet expliciet gemodelleerd worden, maar voor een deel moet impliciete verwerking in het faalgedrag mogelijk zijn.

Opgemerkt moet worden dat veel gevallen van redundantie in de modellering van een onderhoudsmodel kunnen worden ondergebracht in één vervangende component, uiteraard met hiervoor een aangepast faalgedrag. Redundantie is een krachtig middel ter verhoging van de bedrijfszekerheid; hierbij vergeleken is de invloed van de gevolgde onderhoudspolitiek gering. Het ligt daarmee voor de hand als onderhoudspolitiek te kiezen voor storingsafhankelijk onderhoud. Het uitvallen van een paralleltak leidt tot vermindering van de redundantie; herstel dient dan ook zo snel mogelijk te worden uitgevoerd. Eventueel preventief onderhoud aan redundant geschakelde componenten zal, indien noodzakelijk, worden uitgesteld tot de volledige redundantie weer beschikbaar is.

Voor de analyse van complexe, redundante structuren is een decompositie via subsystemen noodzakelijk, waarbij stapgewijs het gevolg van falen van een component voor ieder zuiver parallel of in seriegeschakeld samenstel aan componenten wordt doorgerekend, totdat de consequentie voor het systeem bekend is, zie bijvoorbeeld Lewis [1987].

De parallelstructuur wordt eveneens gebruikt als falen van een component tot gevolg heeft dat slechts een deel van de productiecapaciteit verloren gaat. In dit geval is de modellering aanzienlijk complexer en vereenvoudiging is nauwelijks nog mogelijk. Aan iedere component moet een capaciteit worden toegekend. Volgens de ingebrachte structuur kan na uitval van een component de resterende capaciteit worden berekend. Na het voltooiën van de onderhoudsactie zal de capaciteit dikwijls opnieuw zijn gewijzigd.

De modellering van warme en koude redundantie en partiële productiecapaciteiten zijn aan het ontwikkelde model toegevoegd. De complexiteit van het model en de analyse neemt hierdoor sterk toe en daarmee direct samenhangend de vereiste informatie, maar

vooral de benodigde rekentijd, zie ook Watanabe [1986]. Veruit de meeste praktijktoepassingen zijn beperkt gebleven tot de voor werktuigbouwkundige systemen zeer gebruikelijke serieschakeling van componenten, zie hoofdstuk 7.

Paragraaf 4.4.3: Faal- en herstelgedrag.

De meest gebruikelijke, in paragraaf 2.4.2 toegelichte verdelingen zijn standaard opgenomen in het programma. In een beperkt aantal gevallen blijken de mogelijkheden van deze verdelingen ontoereikend, zoals al eerder werd opgemerkt. Een onderdeel kan een faalgedrag vertonen dat niet door een enkele standaard faalverdeling te beschrijven is, bijvoorbeeld omdat op dat onderdeel meerdere faalmechanismen tegelijk werkzaam zijn. Hoewel in het algemeen de componenten direct zijn gerelateerd aan de kleinste als eenheid te vervangen onderdelen worden in feite niet deze onderdelen, maar de daarop actieve faalmechanismen, resulterend in het stochastische faalgedrag als componenten gemodelleerd. De in eerste instantie voorgestelde indeling sluit echter veel beter aan bij de aanwezige kennis en beschikbare informatie.

Uit de analyse van de (faal-)gegevens kan echter blijken dat het faalgedrag niet kan worden gekarakteriseerd door één van de standaard verdelingen. In dat geval voorziet het model in de mogelijkheid twee of meer, tot een moduul gecombineerde 'schijn'-componenten op te nemen, elk met een eigen faalverdeling. Een schijncomponent modelleert in tegenstelling tot de overige componenten geen (compleet) onderdeel. Op deze wijze kan onder andere de bekende badkuipcurve in zijn totaliteit worden gemodelleerd.

De beschikbare verdelingen kunnen eveneens gebruikt worden voor de stochastische modellering van het herstelgedrag. Maar in de meeste praktische toepassingen blijkt een deterministische herstelduur toereikend. Voor de duur van (ongepland) correctief en (gepland) preventief onderhoud gelden in de praktijk in veel gevallen verschillende normen, hetgeen kan worden gemodelleerd.

Door het gebruik van schijncomponenten kan eventueel ook een niet standaard reparatieverdeling gemodelleerd worden. Vooral voor slecht bereikbare systemen, (b.v. geïsoleerde pompstations) moet de reparatieduur van een component soms door een combinatie van twee standaardverdelingen worden gemodelleerd. Een kortdurende reparatie is mogelijk als al het noodzakelijke materiaal voorhanden is. Zo niet, dan is een veel langere herstelduur te verwachten.

In de meeste situaties zijn de standaard ingebouwde mogelijkheden voldoende. De modulaire opbouw van het programma maakt het toevoegen van minder gebruikelijke, hier onvermelde kansverdelingen echter relatief eenvoudig.

Paragraaf 4.5: Modelling van het onderhoudsconcept.

Als essentieel onderdeel van het onderhoudsproces moet het onderhoudsconcept worden gemodelleerd. De gekozen rekenmethode is dusdanig flexibel dat er in de modelopbouw naar kan worden gestreefd de verschillende politieken herkenbaar te modelleren. Zoals gesteld komt dit de efficiëntie van het simulatieprogramma niet ten goede, maar de inzichtelijkheid van het model, van het simulatieverloop en van de rekenresultaten wordt sterk bevorderd.

Correctief onderhoud is impliciet opgenomen in de simulatie van het systeemgedrag, zoals dat werd weergegeven in het algoritme in paragraaf 4.2. De consequenties van het falen liggen vast in de gemodelleerde functionele en materiële structuur.

De simulatie van preventief onderhoud wordt gerealiseerd door verschillende mechanismen. In de hiervolgende toelichting van elk van die mechanismen zal de indeling uit paragraaf 2.3.1 gevolgd worden. Daar is preventief onderhoud opgedeeld in gebruiksaafhankelijk onderhoud en toestandsafhankelijk onderhoud, waarbij beide eventueel opportunistisch kunnen worden uitgevoerd.

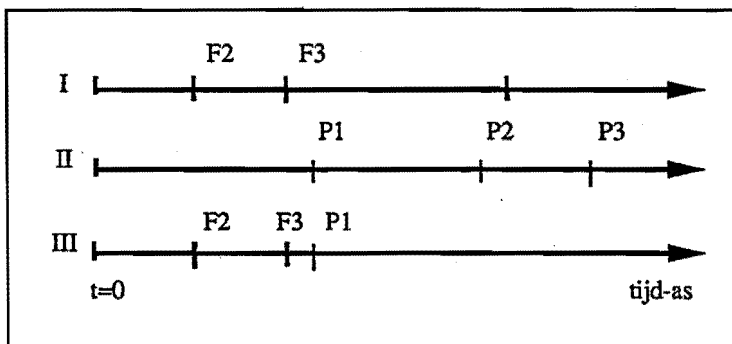
Paragraaf 4.5.1: Gebruiksaafhankelijk onderhoud.

Gebruiksaafhankelijk onderhoud wordt zonder verdere beperkingen direct na realisatie van een te voren vastgestelde prestatie uitgevoerd (periodiek onderhoud). Deze politiek wordt gesimuleerd door van de desbetreffende component X telkens het aselekt getrokken faaltijdstip (F_X) te vergelijken met het moment waarop volgens opgave het preventief herstel moet worden uitgevoerd (P_X). Het eerste van beide is bepalend voor het feitelijk gesimuleerde tijdstip van vervanging. Dit moment wordt opgenomen in de te simuleren reeks van gebeurtenissen, zie figuur 4.4. De aard van de actie wordt gemarkeerd.

Als gevolg van de economische afhankelijkheid tussen de componenten kan aan gebruiksaafhankelijk onderhoud eveneens een opportunistisch karakter worden gegeven door samenvoegen ofwel clustering van onderhoudsacties. In vrijwel iedere praktijk-situatie is een dergelijke clustering gebruikelijk, veel meer nog dan het veel beschreven zuivere gebruiksaafhankelijke onderhoud. De clustering resulteert in een verbetering van

de beschikbaarheid van het systeem en als gevolg daarvan in een vermindering van de onderhoudsafhankelijke kosten.

In het model zijn twee (gerelateerde) mechanismen opgenomen om dit opportunistische onderhoud te simuleren: gebruiksafhankelijk en planafhankelijk volgherstel. Beide zijn vormen van *voorwaardelijk volgherstel*.



Figuur 4.4: G.A.O., gesorteerde reeks van gebeurtenissen, ten tijde $t=0$:

I = Gegeneerde faalmomenten, F.

II = Preventief onderhoud volgens ond.concept, P.

III = Samengestelde reeks voor de simulatie van G.A.O.

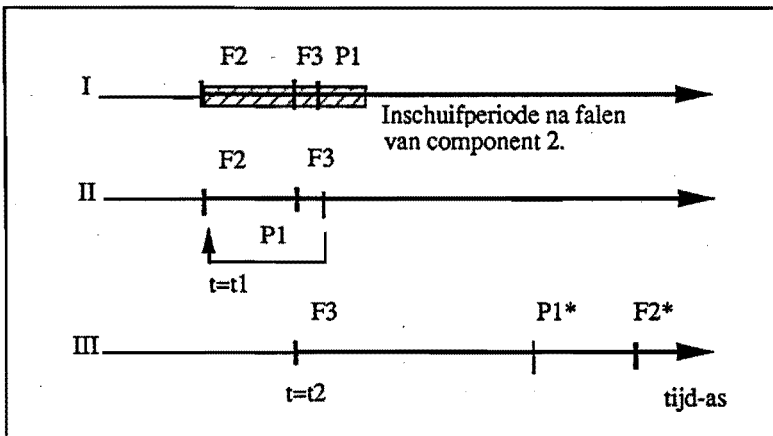
In de praktijk wordt dikwijls de gerealiseerde bedrijfsduur van een (geselecteerd) aantal onderdelen bijgehouden. Bij elke daarvoor geschikte gelegenheid tot vervanging wordt van de relevante onderdelen de op dat moment gerealiseerde bedrijfsduur vergeleken met een tevoren vastgestelde grenswaarde. Indien het onderdeel langer in bedrijf is wordt overgegaan tot preventieve vervanging. Dit is opportunistisch gebruiksafhankelijk onderhoud, ofwel gebruiksafhankelijk volgherstel.

De modellering is exact conform de praktijk. Bij iedere component X kan een geselecteerd aantal componenten worden vermeld waarvan het gerealiseerde aantal bedrijfsuren wordt nagegaan op het moment dat component X hiertoe aanleiding geeft. Component X kan eventueel een schijncomponent zijn. Bovendien kunnen, zowel voor correctieve als voor preventieve acties, los van elkaar staande selecties van componenten worden geformeerd. Op deze wijze kan bijvoorbeeld een onderhoudsconcept worden gemodelleerd dat voorschrijft bij ongeplande, correctieve stops opportunistisch onderhoud te beperken tot hooguit enkele vervangingen in de onmiddellijke nabijheid van de defecte component. De geplande stops worden dan meestal wel zo intensief mogelijk benut voor het uitvoeren van gecombineerd, preventief onderhoud.

Het tweede mechanisme is het planafhankelijke volgherstel, in de praktijk beter bekend als 'inschuiven van preventief onderhoud'. Systeemstops voor het uitvoeren van preventief onderhoud worden (lang) te voren gepland. Indien een ongeplande stop niet lang voor een geplande stop optreedt, zal deze gelegenheid eveneens benut worden voor het (vervroegd) uitvoeren, c.q. inschuiven, van de geplande werkzaamheden. Bepalend voor de (maximale) periode waarover preventief onderhoud wordt vervroegd zijn vooral de vaste kosten van een stop, bijvoorbeeld de uitloop- en/of opstartkosten.

Twee categorieën onderhoudsacties kunnen worden ingeschoven, ten eerste het geplande, gebruikafhankelijke onderhoud en ten tweede het in de volgende paragraaf te bespreken (tijdig) gesignaleerde toestandsafhankelijke onderhoud.

De modellering is als volgt: aan iedere component X kan een voor de preventieve en correctieve situatie verschillende inschuifperiode worden gekoppeld. Wanneer component X faalt, worden alle *geplande* onderhoudsacties die vallen binnen de (correctieve) inschuifperiode tegelijkertijd uitgevoerd; schematisch is dat weergegeven in figuur 4.5. In combinatie met preventief onderhoud aan component X kan een zelfde mechanisme gemodelleerd worden, met dien verstande dat in veel gevallen een andere, preventieve inschuifperiode wordt gehanteerd.



Figuur 4.5: Inschuiven of planafhankelijk volgherstel.

- I = Situatie op $t=t_1$.
- II = Gesimuleerde clustering, 'inschuiven',
- III = Nieuwe situatie ten tijde $t=t_2$,

De mogelijkheden tot opportunistisch onderhoud in een ongeplande of een geplande gelegenheid worden in in de praktijk zeer verschillend benut. Het clusteren van preventief onderhoud in een preventieve stop kan (tot op zekere hoogte) vooraf worden gepland. Ook in de methoden van Kelly [1986] en Gits [1986], paragraaf 3.3, wordt dit volledig onderkend en uitgebuit. In het hier voorgestelde model wordt tevens rekening gehouden met de doorkruising van het geplande onderhoud door storingen. Door (vroegtijdig) falen van een component kan de preventieve actie op de oorspronkelijk geplande datum niet meer nodig zijn. Bovendien kan het model zodanig worden ingericht dat dergelijke storingen benut worden voor het uitvoeren van al dan niet gepland preventief onderhoud aan andere componenten.

Paragraaf 4.5.2: Toestandsafhankelijk onderhoud.

De bedrijfsduur van een component is niet de enige indicatie die voor het uitvoeren van preventief onderhoud kan worden benut. In toenemende mate zijn de aanwijzingen afkomstig van inspectie en/of conditiebewaking (CB) belangrijk. Inspectie en CB zijn altijd belangrijke hulpmiddelen geweest in de beheersing van het onderhoudsproces. Toch is noch in de modellering van systeemgedrag, noch in de modellering van onderhoud veel aandacht besteed aan de invloed van deze onderhoudspolitiek.

Conditiebewaking kan gezien worden als een uitbreiding van de bekende inspectietechnieken, waarbij steeds geavanceerder methoden (commerciële) toegepast worden. Volgens Kelly [1984] zijn drie elementaire vormen van conditiebewaking te onderscheiden.

Eenvoudige inspectie (Simple inspection). Kwalitatieve controle, gebaseerd op zintuiglijke waarneming, 70 % van de CB activiteiten

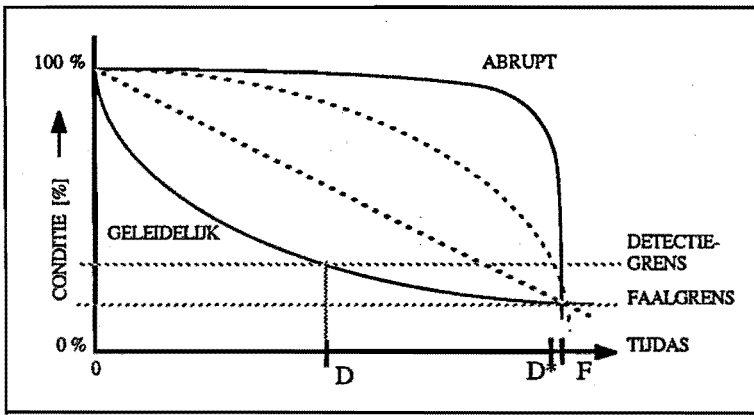
Conditie controle (Condition checking). Routinematige meting en vergelijking van een relevante parameter met een limietwaarde; er is geen registratie.

Trendmatige controle (Trend monitoring). Door nauwkeurige metingen en door registratie wordt gezocht naar trendmatige informatie. Als weinig bekend is over het faalmechanisme, is dit is de meest effectieve categorie van CB.

De beschikbare methoden en technieken voor de feitelijke uitvoering van de bewaking vallen buiten het kader van dit proefschrift. Als inleiding in deze problematiek wordt in de literatuur dikwijls verwezen naar 'The Guide to Condition Monitoring of Machinery'

[1979], waarin de meetprincipes overzichtelijk worden opgesomd. De vermelde technische mogelijkheden zijn inmiddels deels verouderd.

In de modellering van toestandafhankelijk onderhoud wordt geen principiële verschil gemaakt tussen inspectie en conditiebewaking. Door toepassing van beide methoden in al hun uitvoeringsvormen wordt getracht het moment van falen van een component te voorzien door meting van relevante parameters in het (faal)proces. Met deze informatie wordt beoogd tijdig, maar niet voortijdig in te grijpen om zo het op handen zijnde falen te voorkomen. De meetbaarheid én het verloop van een dergelijke parameter (prognostic characteristic, Geraerds [1972]) zijn de essentiële voorwaarden voor de mogelijke toepassing en effectiviteit van deze onderhoudspolitiek.



Figuur 4.6: Abrupt en geleidelijk conditieverloop. D is het detectiemoment, $(F-D)$ is de detectie periode.

Een geleidelijk afnemende conditie geeft ruime gelegenheid tot het voorspellen van de resterende standtijd en het plannen van het uit te voeren onderhoud. Als slechts kort voor het falen een abrupte overgang te signaleren is, dan is de onderhoudsplanning niet gebaat met CB, maar wel kan eventuele volgschade worden voorkomen door snel afschakelen van de componentbelasting (beveiliging).

Informatie over de faalverdeling is niet strikt noodzakelijk; het verloop van de faalintensiteit is niet relevant. Dit is een belangrijk voordeel van CB, vooral voor systemen waar geen of weinig ervaring mee is opgebouwd. Indien het faalgedrag wel bekend is, dan kan dit worden gebruikt ter bepaling van de (theoretisch) optimale inspectiefrequentie, zie Sherwin [1979]. De kosten voor de CB kunnen daarmee zo laag mogelijk worden gehouden.

De modellering van toestandafhankelijk onderhoud en het effect op het systeemgedrag worden bemoeilijkt door een aantal problemen. Een belangrijke complicatie is het gebrek aan informatie over het verwachte conditieverloop en de feitelijke ligging van de herstelgrens, dat is het moment waarop de onderhoudsbehoefte wordt onderkend, en de faalgrens. Daarnaast is het verschil in continue en periodieke bewaking een belangrijk gegeven, waarbij ook nog geldt dat de inspectiefrequentie niet constant is. Deze frequentie kan afhankelijk zijn van het resultaat van de vorige meting(en). Bovendien is in veel situaties inspectie alleen mogelijk als een apparaat daarvoor (toevallig) toegankelijk is, bijvoorbeeld tijdens een onderhoudsbeurt.

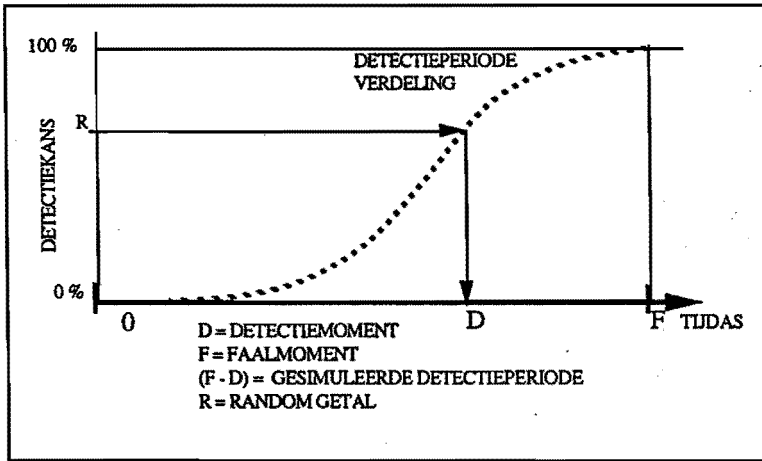
Na een oriëntatie in de praktijk is als antwoord op de geconstateerde problemen gekozen voor de volgende opzet. In eerste instantie wordt uitgegaan van continue bewaking. Er wordt verondersteld dat een eventuele beïnvloeding van het faalgedrag door CB is opgenomen in de kwantificering van het aangenomen faalgedrag.

CB verschaft vroegtijdig informatie over een op handen zijnd falen. De periode tussen het moment van deze detectie en het feitelijke moment van falen wordt de detectieperiode (lead time) genoemd. In de modellering van deze periode worden zowel het conditieverloop als de gehanteerde bewakingsmethode tot uitdrukking gebracht.

Door de grote verscheidenheid aan invloedsfactoren ontwikkelt een aankomend falen zich niet altijd volgens het zelfde patroon en dat resulteert in een niet eenduidig vast te leggen conditieverloop en dus in een variabele detectieperiode. Daarom is de detectieperiode als stochast gemodelleerd. De (gemiddelde) lengte van het detectieinterval en het verloop van de curve worden benut om het effect van CB te modelleren, zie figuur 4.7.

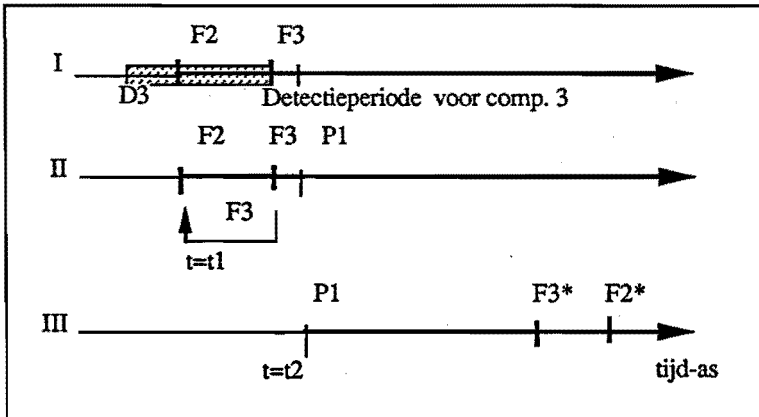
Ervaring heeft uitgewezen dat kwantitatieve informatie over deze detectieperiode (eventueel de verdeling ervan) in een praktijksituatie eenvoudiger te achterhalen is dan gegevens over het verloop van de conditie en de daarbijbehorende beslissingsgrenzen. Zonder hier in details te treden kan worden opgemerkt dat, ook wanneer gedetailleerde informatie over het te verwachten conditieverloop beschikbaar is, de voorgestelde modellering niet tot ernstig informatieverlies leidt. Dit geldt bijvoorbeeld voor het vervuilingproces in een warmtewisselaar. In paragraaf 7.3 staat een illustratie.

Zoals gesteld, kan in de periode tussen de detectie en het feitelijke faalmoment het noodzakelijke onderhoud worden gepland. In het model is ervan uitgegaan dat voor het herstel van een gedetecteerd, aankomend falen gelijksoortige condities gelden als voor het overige preventieve onderhoud. Zo wordt de herstelduur bepaald uit de preventieve herstelverdeling.



Figuur 4.7: Simulatie van de (stochastische) detectieperiode voor toestandsafhankelijk onderhoud.

Gedurende de detectieperiode kan door een andere component een gelegenheid tot opportunistisch onderhoud gecreëerd worden. Het ligt voor de hand de gedetecteerde storing gedurende deze gelegenheid te verhelpen om zo de noodzaak tot een stop (preventieve) in de nabije toekomst te vermijden. Het hiertoe in de methode ondergebrachte mechanisme is vrijwel identiek aan het inschuiven uit paragraaf 4.5.1, zie figuur 4.8.



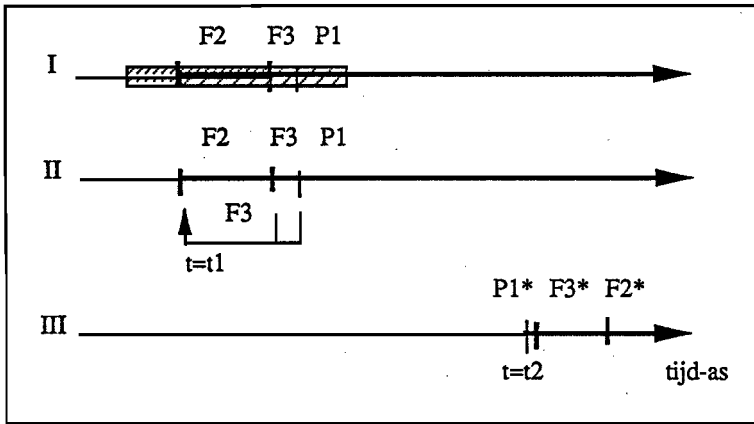
Figuur 4.8: Clustering van gedetecteerd falen.

I = Situatie ten tijde $t=t_1$.

II = Gesimuleerde clustering van gedetecteerd falen.

III = Nieuwe situatie ten tijde $t=t_2$

Het effect van de clustering van onderhoud wordt vergroot wanneer beide inschuifmechanismen worden toegepast, een in de praktijk gebruikelijke situatie, zie figuur 4.9. Voor een verloop zoals hier geschetst zal ten tijde $t=t_2$ waarschijnlijk opnieuw opportunistisch onderhoud worden gesimuleerd, immers component 3 wordt bewaakt.



Figuur 4.9: Planafhankelijk en toestandsafhankelijk opportunistisch onderhoud.

Conditiebewaking levert niet altijd volledig betrouwbare resultaten. In veel gevallen kan slechts een indirect signaal gemeten worden, bijvoorbeeld een akoustisch signaal als indicatie voor de lagerspeling. Ook kan een bewakingssysteem ongemerkt defect zijn geraakt. De resulterende, beperkte betrouwbaarheid van de CB kan worden gemodelleerd door opgave van het percentage onopgemerkte faalgebeurtenissen. Voor de benodigde kwantificering kan in de meeste gevallen slechts worden afgegaan op schattingen door terzakekundigen. Ook als slechts één van de op een onderdeel actieve faalmechanismen kan worden bewaakt, blijft onaangekondigd falen mogelijk. Overeenkomstig de realiteit kan CB (ook) op slechts één van de gemodelleerde mechanismen worden gesimuleerd.

Het model is gecompleteerd door het scheppen van de mogelijkheid tot een 'vals alarm' veroorzaakt door de CB, waardoor een (achteraf) onnodige actie wordt gesimuleerd. Deze mogelijkheid is ingevoerd voor de situaties waar iedere systeemstop grote (financiële) consequenties heeft, een bekende situatie in de procesindustrie. Voor het optreden van een dergelijk 'vals alarm' wordt een toevallig gedrag verondersteld. Het effect kan per bewaakte component worden gesimuleerd of op systeemniveau, voor alle CB-systemen samen.

Bij periodieke of opportunistische CB wordt de inspectie- of meetfrequentie als belangrijke parameter onderkend. Vooral als CB slechts opportunistisch kan worden uitgevoerd, is het uiteindelijke effect op het systeemgedrag moeilijk te voorspellen. Maar omdat in deze situatie de extra (financiële) inspanning in veel gevallen gering is, is een uitgebreid inspectievoorschrift vaak een essentieel deel van het onderhoudsconcept.

De modellering is als volgt. Bij iedere component kan een geselecteerd aantal andere componenten worden genoemd welke worden geïnspecteerd indien daartoe de gelegenheid bestaat. Indien een inspectie valt binnen de gesimuleerde detectieperiode zal overgegaan worden tot preventieve vervanging. Wederom kunnen voor een correctieve of preventieve gelegenheid de invoergegevens verschillen.

Door een schijncomponent het signaal tot inspectie te laten afgeven, kan periodieke inspectie gesimuleerd worden.

Paragraaf 4.6: Financieel model.

Een kostencalculatie biedt, als een essentieel deel van een onderhoudsmodel, de mogelijkheid alle (gedrags-) informatie onder één noemer te brengen, ter ondersteuning van een optimalisatieproces. In het programma is daartoe een eenvoudig kostenmodel opgenomen, gebaseerd op het in paragraaf 2.6 voorgestelde schema.

De totale onderhoudskosten worden samengesteld uit een deel onderhoudsuitvoeringskosten (OUK) en een deel onderhoudsafhankelijke kosten (OAK). De OUK omvatten de uitgaven direct voortkomend uit het uitvoeren van onderhoudsacties en in de OAK zijn alle overige (indirecte) uitgaven en opbrengstverliezen ten gevolge van het uitgevoerde onderhoud verzameld. Voor elke gesimuleerde onderhoudsactie worden beide kostensoorten berekend.

In de OUK worden materiaal- en loonkosten gesommeerd. Per component zijn de materiaalkosten bekend. De loonkosten worden uit de volgens de herstelverdeling gesimuleerde herstelduur, uit het aantal personen dat voor de uitvoering van de actie moet worden ingezet en uit het uurloon afgeleid. Per manuur zijn de lasten voor alle componenten gelijk verondersteld. Overhead-kosten, kosten voor specialistisch personeel en dergelijke moeten dus worden omgeslagen in een aangepast bedrag per manuur of in een gecorrigeerd aantal in te zetten personen.

De OAK zullen in de praktijk voornamelijk bestaan uit de opbrengstverliezen door (gedeeltelijke) productiederving. Voor de berekening zijn de duur van de actie en de kosten per tijdseenheid bepalend. In de situatie waarin slechts een deel van de capaciteit

verloren gaat als gevolg van een onderhoudsactie, is het berekende percentage productiefout belangrijk. Het verschil in kosten voor een (on geplande) correctieve en een (geplande) preventieve actie komt voort uit de voor beide categorieën verschillende actieduur, maar eveneens uit een ander bedrag voor de productiedervingskosten per tijdseenheid. De kosten voor inspectie/CB worden per tijdseenheid verrekend, voor ieder systeem apart of voor het gehele systeem gesommeerd in een totaal bedrag per tijdseenheid.

Het kostenmodel is uit te breiden met een voor elke stop geldende vaste kostenpost en/of vaste (minimale) stopduur. Dit kan de modellering van een afkoel- en/of opstartperiode zijn, of een periode waarin slechts een product van mindere kwaliteit kan worden vervaardigd.

Het geformuleerde kostenmodel is bewust eenvoudig gehouden. Men zou kunnen denken aan het verfraaien van de huidige opzet door in het model de uitgaven voor onderhoud te verrekenen naar de contante waarde, of andere, bijvoorbeeld belasting-technische verfijningen toe te passen. Dit is pas zinvol als het volgende probleem in bevredigende mate kan worden opgelost. De lengte van een actie is eenduidig te modelleren zolang slechts één component wordt hersteld. Ook wanneer in één actie steeds bekende combinaties van componenten worden geclusterd is een goede schatting van de (stochastische) herstelduur te simuleren. Opportunistisch onderhoud resulteert echter meestal in een te voren niet bekende combinatie van onderhoudsacties, zodat ook de duur van de totale actie onbekend zal zijn. Deze moet worden afgeleid uit een combinatie van de herstelduur van elke in de actie vervangen component. Een algemene regel is hiervoor niet voorhanden. In de praktijk worden netwerkmethoden toegepast om een complexe stop te combineren tot een efficiënt verlopend geheel. Hoewel de uitvoering als zodanig in principe niet onmogelijk is, wordt een dergelijke verfijning van het simulatiemodel als te vergaand beschouwd.

De gedetailleerdheid van het ontwikkelde model, maar vooral de flexibiliteit van de gekozen methode kan worden benut om de diverse mogelijkheden in stopduurberekeningen te modelleren. De meest eenvoudige formule is wel om van alle in één stop vervangen componenten de langst gesimuleerde hersteltijd als actieduur te simuleren, terwijl het benodigde aantal manuren wordt bepaald door de gesommeerde herstelduur. Het programma hanteert in een simulatie voor iedere actie telkens dezelfde regel. Voor de meerderheid van de toepassingen is het geschetste model toereikend.

Paragraaf 4.7: Presentatie MAINSITHE.

Het onderhoudsmodel is opgenomen in een computerprogramma, dat bekendheid heeft verworven onder de naam MAINSITHE. Deze naam staat voor Maintenance Simulation THE. Op dit moment is een versie geschikt voor het Vax-VMS operating-system en bestaat er een versie voor gebruik op een Prime. Een PC versie is nog niet beschikbaar. De programmeercode is Fortran 77. Om de plaatsingsmogelijkheden niet te verminderen, is geen gebruik gemaakt van ondersteunende, statistische software. In feite bestaat het pakket uit twee delen: een invoerprogramma en het eigenlijke simulatieprogramma.

Het invoerprogramma.

De hoeveelheid te verwerken gegevens is omvangrijk, natuurlijk afhankelijk van de probleemstelling. Een gestructureerde, gebruikersvriendelijke wijze van invoer is zeer gewenst. Het invoerprogramma voorziet in een gerichte vraagstelling aan de analist, teneinde onnodige complicaties te voorkomen en eventuele tegenstrijdigheden in de ingevoerde informatie te vermijden. Bovendien biedt het programma de mogelijkheid om -op verzoek- bij iedere vraag relevante uitleg te geven. Minder ervaren gebruikers worden hiermee effectief ondersteund. Overigens is het aan te bevelen het gebruik van de methode, met name de modellering van het systeem en de interpretatie van resultaten, over te laten aan deskundig personeel.

Het invoerprogramma verzamelt, ordent en verifieert de in te voeren gegevens op een gestructureerde manier, het werkt volledig menugestuurd. Gericht wijzigen behoort tot de mogelijkheden. De invoergegevens betreffen:

- de beveiliging van het simulatieproces; maximum aantal te simuleren systeemstops e.d.,
- de begrenzingen aan de simulatie; de runlengte in de vorm van de systeemlevensduur en het maximum aantal te simuleren runs, eventueel in combinatie met een opgave van de gevraagde nauwkeurigheid in het eindresultaat van de simulatie,
- de systeemgegevens; componentaantal en systeemstructuur (serie, parallel en eventueel productiecapaciteit per component),
- de financiële gegevens; de stilstandkosten voor het systeem (O.A.K), verschillend voor preventief (gepland) en correctief (ongepland)

onderhoud, en de te verrekenen kosten per manuur voor onderhoud (O.U.K.),

- het onderhoudsconcept; S.A.O, G.A.O, T.A.O, onvoorwaardelijk volgherstel, etc. Niet altijd blijkt het nodig iedere mogelijkheid, die het model biedt, te gebruiken. In deze fase ontkennend antwoorden op de gestelde vragen voorkomt onnodig werk in een later stadium,
- de componentgegevens; per component wordt tenminste gevraagd naar:
 - het faalgedrag,
 - het voor S.A.O. te simuleren herstelgedrag,
 - de materiaalkosten voor de component,
 - het aantal voor het onderhoud in te zetten personen.

Afhankelijk van de te simuleren onderhoudspraktijk moeten deze gegevens aangevuld worden met:

- de kwantificering van het toe te passen G.A.O. en/of het T.A.O.,
- het voor G.A.O en T.A.O te simuleren herstelgedrag,
- de kwantificering van de regels voor het opportunistische onderhoud,
- de eventuele volgschade/volgherstel relaties.

Voor het opportunistische onderhoud en de volgschade/volgherstel relaties kunnen voor correctief en voor preventief onderhoud onderling verschillende regels worden ingevoerd

Het product van het invoerprogramma is de 'invoer'-file, welke door het simulatieprogramma kan worden verwerkt en, eventueel ter wijziging, ook door het invoerprogramma opnieuw kan worden ingelezen.

Het simulatieprogramma.

Het globale simulatiealgoritme is afgebeeld in figuur 4.2. In de voorgaande paragrafen is (schematisch) aangegeven hoe rekening kan worden gehouden met de afhankelijkheden tussen de componenten en het S.A.O., het G.A.O. en het T.A.O. Het programma is modulair opgebouwd, dat wil zeggen dat voor de simulatie van het onvoorwaardelijke volgherstel en het (opportunistische) onderhoud in het programma een aantal subroutines opgenomen zijn, elk met een duidelijke functie.

Zo zijn subroutines geschreven voor:

- onvoorwaardelijk volgherstel, of volgschade (correctief en preventief),
- onvoorwaardelijk G.A.O.,
- onvoorwaardelijk T.A.O.; zowel voor continue als voor periodieke CB.

Voor het opportunistische onderhoud zijn routines geschreven voor:

- voorwaardelijk G.A.O., gebruiks- en planafhankelijk volgherstel.
- voorwaardelijk T.A.O., conditieafhankelijk volgherstel.

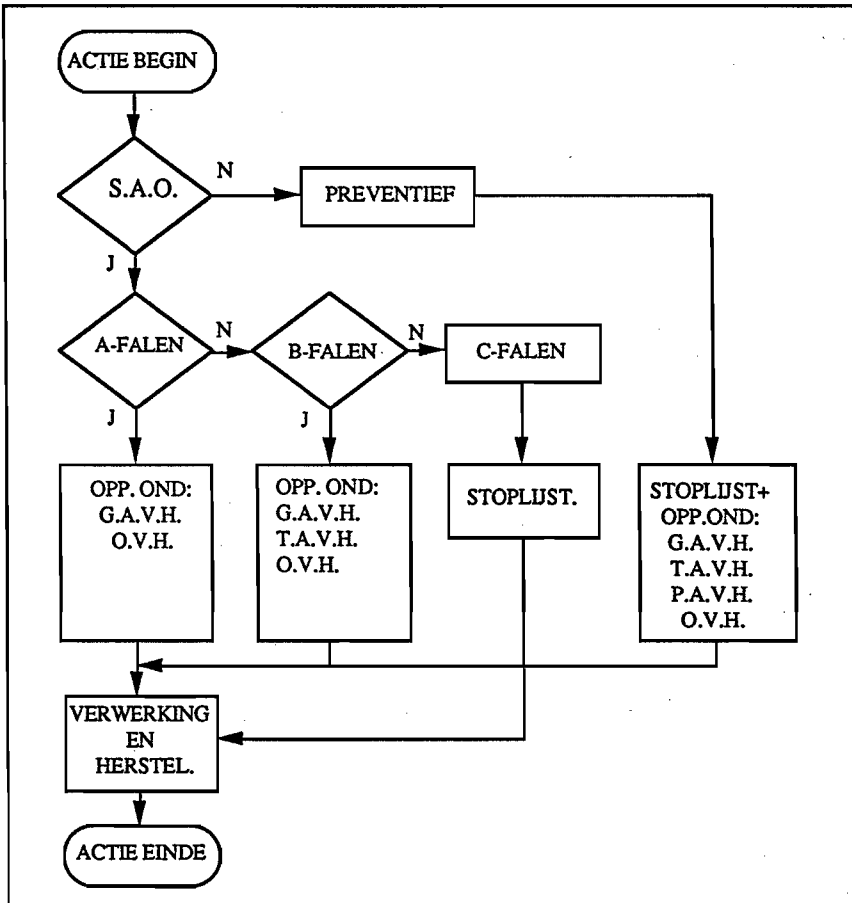
In de praktijk wordt telkens een verschillende combinatie van de geschetste mogelijkheden aangetroffen, welke in het simulatiemodel meestal nauwgezet kan worden gevolgd. Daarom zal bij de volgende uitleg van het feitelijke simulatieverloop gebruik worden gemaakt van een onderhoudsconcept, zoals dit is gemodelleerd voor de simulatie van een dieselmotor voor tractiedoeleinden, zie ook paragraaf 7.3.

De aard van het te simuleren object maakt een indeling van het correctieve onderhoud naar de ernst van de gevolgen van de storing noodzakelijk; daarom wordt onderscheid gemaakt in A, B en C-falen. Indien een storing leidt tot onmiddellijke stilstand van het object is dat een A-falen; hiervoor gelden hoge O.A.K. per uur. Een B-falen is een defect dat zo snel mogelijk verholpen moeten worden, maar dat gering uitstel kan velen omdat de directe gevolgen voor het functioneren van het object (eerst nog) beperkt blijven. Wanneer met de reparatie van een geconstateerd defect gewacht kan worden tot een (eerder) geplande gelegenheid, is dat een C-falen; het defecte onderdeel wordt bijgeschreven op de 'stoplijst'.

De praktijk leert dat in een aantal gevallen eenzelfde component alle bovengenoemde vormen van falen kan veroorzaken. Daarom is het rekenmodel zodanig aangepast dat voor elke component het percentage A,B en/of C-falen kan worden ingevoerd. Deze uitbreiding van het model is ook in andere toepassingen zeer bruikbaar gebleken. Een stoplijst is bijvoorbeeld in de procesindustrie een bekend begrip.

Het onderhoudsconcept en de ernst van de gevolgen van het falen hangen nauw samen. Tijdens een A-falen bijvoorbeeld zal slechts het minimaal noodzakelijke onderhoud verricht worden. In een geplande, preventieve actie echter worden niet alleen de op de stoplijst bijgeschreven componenten vervangen, maar is er tevens de gelegenheid tot (periodiek of opportunistisch) onderhoud als inspecties en dergelijke. In figuur 4.10 is de schematische opzet van het hier gesimuleerde onderhoudsconcept weergegeven.

Na het op $t=0$ genereren en sorteren van de standtijden van alle componenten wordt overgegaan op de simulatie van de eerste actie, stel aan component X. Dit is het beginpunt van het in figuur 4.10 afgebeelde flowschema. De aard van de actie is bekend. Wanneer ongepland S.A.O. gesimuleerd wordt, is nader te bepalen of het een A,B of C-falen betreft. Dit wordt met de hiervoor ingevoerde verdeling voor component X 'random' bepaald.



Figuur 4.10: Schematische weergave van het onderhoudsconcept.

O.V.H. = Onvoorwaardelijk volgherstel.

Opportunistisch onderhoud:

G.A.V.H. = Gebruiksafhankelijk volgherstel.

T.A.V.H. = Toestandsafhankelijk volgherstel.

P.A.V.H. = Planafhankelijk volgherstel, (inschuiven).

Neem aan dat het een A-falen is. Deze storing resulteert in een onmiddellijke stilstand van het object, waarvoor met (hoge) O.A.K. moet worden gerekend. Het onderhoudsconcept in dit geval is erop gericht een zo kort mogelijke stop te realiseren. Het totaal aan uit te voeren (en te simuleren) werkzaamheden moet zoveel mogelijk worden beperkt tot component X, eventueel in combinatie met één of enkele componenten in de directe nabijheid van X.

Alleen opportunistisch onderhoud in de vorm van gebruiksfafhankelijk volgherstel zal worden gesimuleerd, tijd om één of meer componenten op conditie te beoordelen is er niet. De subroutine voor het gebruiksfafhankelijke volgherstel wordt aangeroepen. Voor een bij X geselecteerd aantal componenten wordt de momentane standtijd vergeleken met de minimale standtijd voor dit opportunistische G.A.O. Als voor component G vervanging aan de orde is, wordt deze bijgeschreven op de actielijst, de verzameling van alle, in deze stop te vervangen componenten.

Dan wordt voor elk van de op deze lijst voorkomende componenten (dus b.v. X en G) de als onvoorwaardelijk volgherstel opgegeven componenten verzameld en toegevoegd aan de actielijst. Voor X is dat het volgherstel voor een correctieve actie, voor G is dat het volgherstel van een preventieve actie. Op deze wijze wordt het totaal pakket aan te vervangen componenten verkregen, waarbij nauwlettend op doublures wordt gecontroleerd. Dat is belangrijk voor de uiteindelijke kostencalculatie.

In de simulatie wordt nu de duur van de actie bepaald door de gesimuleerde herstelduur van de componenten X en G te combineren, volgens de opgestelde regels. De hersteltijd van de onvoorwaardelijk vervangen componenten is opgenomen in de herstelverdeling van de verantwoordelijke component, de combinatie is immers tevoren bekend. De O.A.K. en de O.U.K., de personele lasten en de materiaalkosten, worden bepaald, waarna de totale kosten van deze actie bekend zijn. Als laatste kan dan het feitelijke herstel worden gesimuleerd, door voor iedere component op de actielijst een nieuwe standtijd te genereren, uit de desbetreffende faalverdeling. Deze worden op de juiste plaats ingevoegd in de gesorteerde reeks van standtijden.

Voor de simulatie van een B-falen wordt uitgegaan van lagere O.A.K per uur; er is meer tijd voor opportunistisch onderhoud. De simulatie van een actie verloopt grotendeels analoog aan die van het A-falen, met dien verstande dat voor component X nu ook nog de subroutine wordt aangeroepen voor het conditieafhankelijke volgherstel. Van een bij X opgegeven aantal componenten wordt gecontroleerd of het (in de simulatie bekende) faalmoment kan worden gedetecteerd. Als het moment van de inspectie binnen de gesimuleerde detectieperiode ligt, dan wordt de desbetreffende component T bijge-

schreven op de actielijst, ter preventieve vervanging. Voor het overige verloopt de simulatie van de actie analoog aan het A-falen. Het C-falen resulteert slechts in het bijschrijven van de defecte component X op de zogenaamde stoplijst. Totdat het herstel is uitgevoerd wordt de component op nonactief gesteld.

Wanneer de aard van de stop gepland (G.A.O. of T.A.O.) is, mag verondersteld worden dat de O.A.K. laag zijn of zelfs gelijk aan nul. Er is meer gelegenheid tot opportunistisch onderhoud en de actielijst wordt als volgt samengesteld:

- component X,
- componenten op de stoplijst,
- gebruiksafhankelijk volgerstel, voor component X
- toestandsafhankelijk volgherstel, voor component X
- planafhankelijk volgherstel, inschuiven, voor elke ingeschoven component opnieuw gevolgd door gebruiks- en toestandsafhankelijk volgherstel.
- onvoorwaardelijk volgherstel, voor alle verzamelde componenten op de actielijst.

Simulatie van het planafhankelijk volgherstel geschiedt als volgt. Aan component X is een inschuifperiode I verbonden, waarmee bereikt wordt dat vanaf het huidige moment, elke tevoren bekende actie over een periode I reeds nu wordt uitgevoerd. Twee categorieën onderhoudsacties kunnen worden ingeschoven: ten eerste het geplande G.A.O. en ten tweede het (op dit moment) gesignaleerde T.A.O. Welke componenten zullen worden ingeschoven is meestal niet tevoren bekend, dit mechanisme heeft niet het lokale karakter van het overige voorwaardelijke volgherstel. Daarom wordt voor elke ingeschoven component I opnieuw de subroutines voor het voorwaardelijke volgherstel aangeroepen. Inschuiven kan zo tot een snelle uitbreiding van de actielijst leiden.

Als laatste wordt van alle op dit moment in de actielijst verzamelde componenten het onvoorwaardelijke volgherstel bepaald. Steeds worden doublures voorkomen. Voor het overige is de afwikkeling van de gesimuleerde actie analoog aan het gesimuleerde A-falen, natuurlijk met dien verstande dat de gegevens die voor preventieve acties zijn ingevoerd, worden gebruikt.

De opbouw van het totale werkpakket aan correctieve en preventieve handelingen in een actie, is de essentie van de simulatie. Voor het overige wordt, telkens op de daarvoor geëigende momenten, de informatie bijgewerkt en/of verzameld over bijvoorbeeld de systeemleeftijd, het 'overall' systeemgedrag, eventueel de momentane productiecapaciteit etc., of wordt -indien daarom is verzocht- opdracht gegeven voor het uitvoeren van (tussen)resultaten.

Uitvoermogelijkheden.

De resultaten van het simulatieprogramma worden opgeslagen in twee 'uitvoer'-files: een file voor de standaard-uitvoergegevens en een file voor de specifiek opgevraagde (tussen)resultaten, afhankelijk van het te analyseren probleem. De standaard-file bevat ter controle ten eerste de weergave van de ingevoerde gegevens. Op verzoek kan dit soms omvangrijke deel achterwege worden gelaten. De simulatieresultaten worden gepresenteerd op component- en systeemniveau. Per component wordt gerapporteerd over:

- het aantal en de oorzaak van het aantal gesimuleerde onderhoudsacties,
- het procentuele aandeel voor correctief, resp. preventief onderhoud in het totaal,
- de gemiddelde gerealiseerde bedrijfstijd tot vervanging,
- het (procentuele) aandeel in de O.U.K., de O.A.K. en in de totaalkosten.

Gecombineerd geeft de in tabelvorm gepresenteerde, kwantitatieve informatie een goed beeld van het gesimuleerde systeemgedrag. Bovendien wordt de informatie verstrekt die nodig is voor de besluitvorming in een gericht optimalisatieproces, onder andere ten behoeve van het ontwerp van een onderhoudsconcept of voor het efficiënt modificeren van het systeem. De hoeveelheid parameters is in de meeste praktische situaties dusdanig groot dat het zeer moeilijk, zo niet onmogelijk wordt geacht het programma zelfoptimaliserend te maken.

Op systeemniveau worden de algemene gegevens betreffende het overall systeemgedrag gepresenteerd. De informatie is onder andere geschikt voor een (eerste) evaluatie van een ontwerp of een onderhoudsconcept. Voor elk van de gepresenteerde kentallen wordt naast de schatting voor het gemiddelde en de gesimuleerde spreiding, het (90 en 95%) betrouwbaarheidsinterval berekend, zie paragraaf 4.3. De kengetallen zijn:

- Mean Time Between Failures,
- Mean Time Between Preventive Maintenance,
- Mean Time Between Maintenance,
- Mean Time To Repair,
- Mean Time To Maintain
- Mean Time For Preventive Maintenance.
- Availability, de (on)beschikbaarheid indien relevant, gespecificeerd naar correctief en preventief onderhoud.
- de totale onderhoudskosten over de gesimuleerde systeemlevensuur.

In een aantal situaties is het tijdsafhankelijke verloop van het gesimuleerde systeem-gedrag belangrijk. Per ingegeven periode (b.v. kwartaal) wordt gerapporteerd over:

- de MTBF,
- de MTBPM,
- het gemiddeld per run gesimuleerde aantal correctieve en preventieve acties,
- de totale onderhoudskosten, per periode en cumulatief.

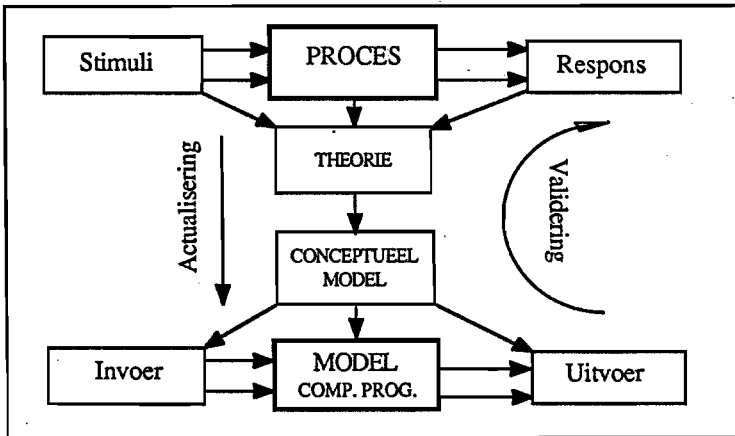
Desgewenst kan het programma verder nog een (geselecteerd) aantal simulatie-resultaten van iedere run in de standaard uitvoer-file opnemen. Van het simulatieproces kan, via de terminal, van elke gesimuleerde onderhoudsactie gedetailleerd verslag worden gedaan. De omvang van deze uitvoer is echter enorm, zodat aangeraden wordt het gebruik ervan te beperken tot (noodzakelijke) eerste controle.

Paragraaf 4.8 Validatie.

De validatie van de gehanteerde modellen en methoden is een niet afdoende opgelost probleem in de bedrijfszekerheid in het algemeen. Het is een van de moeilijkste aspecten in het gehele proces van modelbouw, maar niettemin zeer belangrijk.

Een volledige validatie vereist een gedegen controle op een aantal fasen in de model-opbouw. In figuur 4.11 worden deze fasen geïllustreerd. Door stapsgewijs toe te lichten hoe de verschillende fasen geverifieerd / gevalideerd kunnen worden, zal de juistheid van het ontworpen model, voor zover mogelijk, worden aangetoond. Wanneer de in een model als basis gebruikte theorie geverifieerd kan worden en het opgestelde, conceptuele model geloofwaardig is en het computerprogramma het model op de juiste wijze representeert en de simulatieresultaten overeenkomen met de empirische informatie, slechts dan kan een (simulatie)model een waardevolle bijdrage leveren aan het wetenschappelijk inzicht in de onderzochte materie.

Als de simulatieresultaten niet overeenkomen met de werkelijkheid, dan is aan ten minste één van de vier voorwaarden niet voldaan. Het kan een indicatie zijn dat de door het model gehanteerde theoretische basis onvoldoende is en op zich heeft dat ook waarde in het wetenschappelijke proces van kennisopbouw.



Figuur 4.11: De ontwerpcyclus van een simulatiemodel, (bron: Lehman 1977).

Zoals gesteld, zal in eerste instantie de aan het model ten grondslag liggende theorie moeten worden geverifieerd, waarbij in het algemeen moet worden opgemerkt dat de basis van een simulatiemodel niet altijd uit een goed gedefinieerde theorie bestaat. Soms moet het simulatiemodel als zodanig als model worden beschouwd. Het ontwerp van het model is volledig gericht op het in overeenstemming brengen van de simulatieresultaten met de waarnemingen. In het algemeen zijn een viertal criteria te noemen waaraan een goede theorie moet voldoen, zie Popper [1959]. Deze zijn: een zo groot mogelijk toepassingsgebied, weerlegbaarheid, nauwkeurigheid en eenvoud.

Het opgestelde onderhoudsmodel veronderstelt op componentniveau het vernieuwingsmodel. Dit is gebaseerd op de basisgedachte dat in een onderhoudsmodel de kleinste als eenheid te vervangen onderdelen als component worden gemodelleerd, toegelicht in paragraaf 2.1. De juistheid van de veronderstelling kan worden onderbouwd door een nauwgezette analyse van de gegevens van het (component)faalgedrag. Het vernieuwingsmodel vereist een onafhankelijk, identiek verdeeld faalgedrag voor de opeenvolgende gebeurtenissen. Aan de vraagstelling betreffende de validiteit van de gehanteerde theorie wordt daarmee voldaan door de (statistische) analyse van de gegevens. Ook hier blijkt het belang van de juiste componentkeuze in de systeemmodellering. De evaluatie en de analyse van de (faal)gegevens vormen een essentiële stap in de modellering van een systeem. In hoofdstuk 6 zal daarom op deze problematiek nader worden ingegaan.

De tweede fase in de validatie is de verantwoording van het conceptuele model. Voor de simulatie van de verschillende onderhoudspolitieken omvat het model een aantal mechanismen. De toelichting in paragrafen 4.2 tot en met 4.5 is een essentiële verant-

woording van de rationalisatie en de logica van het conceptuele model. Uit deze paragrafen blijken het (afgebakende) toepassingsgebied, de overeenkomsten en de verschillen tussen modelbouw en realiteit. De relatieve eenvoud van de mechanismen en de nagestreefde analogie aan de reële situatie maken essentiële controle mogelijk.

De volgende fase in de validatie is de verificatie van het ontwikkelde programma op een juiste weergave van het conceptuele model. Voor een deel bestaat dit proces uit het stapsgewijs controleren van het juiste functioneren van het programma, het feitelijke 'debugging process'. De verificatie van een correct verloop van de simulatie kan plaatsvinden door een mogelijke terugmelding van het gesimuleerde systeemgedrag. Het opgestelde programma is zo ingericht dat van iedere gesimuleerde actie verslag kan worden gedaan, inclusief de effecten van het gemodelleerde onderhoudsconcept. Daarnaast kunnen per run de belangrijkste resultaten weergegeven worden, telkens als een run is voltooid. Tenslotte worden in het uiteindelijke simulatieresultaat ook deelresultaten geproduceerd, welke als toelichting dienen op de als eindresultaat gepresenteerde kengetallen en kostenniveaus. De open structuur van het programma geeft afdoende mogelijkheden deze stap in het validatieproces te verifiëren.

De voltooiing van de validatie moet worden gerealiseerd door vergelijking van de simulatieresultaten met de respons van het werkelijk optredende proces. In principe moet de overeenkomst tussen de empirische gegevens en de simulatieresultaten kunnen worden vastgesteld en beoordeeld. Het gebruik van formele, statistische methodes lijkt hiervoor niet noodzakelijk, het langs informele weg toetsen blijkt voor een simulatiemethode zeer gebruikelijk, zie onder andere Abelson [1968], Newell en Sin [1976] en Lehman [1977]. Reitman [1965] stelt voor, indien mogelijk, de tussentijdse resultaten uit de simulatie te vergelijken met de reële situatie. Als die vergelijkbaar zijn kan de simulatie als succesvol worden beschouwd.

Resumerend kan gesteld worden dat een eenduidige, formele methode ter validatie van een simulatiemodel in de literatuur niet bekend is. Misschien komt dit omdat door het karakter van veel van de gemodelleerde problemen het hanteren van formele methoden onmogelijk is. De eerste drie fasen in het ontwerp van het onderhoudsmodel zijn voldoende te verifiëren, de laatste fase moet te allen tijde plaatsvinden in de praktijk, ook al omdat iedere praktijksituatie uniek is en vaak een (geringe) aanpassing van het opgestelde onderhoudsmodel vraagt. In hoofdstuk 7 zal voor de beschreven praktijktoepassingen op deze problematiek worden teruggekomen.

5 ONDERHOUDSCONCEPT KEUZE EN KWANTIFICERING

Het onderhoudsconcept omvat de keuze in kwalitatieve en kwantitatieve zin van de te volgen onderhoudspolitieken tot op componentniveau, de elementaire onderhoudspolitieken. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de factoren die van belang zijn voor de selectie van die onderhoudspolitieken. Enkele meer kwalitatieve factoren worden toegelicht in paragraaf 5.1. Paragraaf 5.2 gaat in op de kwantificering van gebruiksfhankelijk onderhoud voor enkelvoudige systemen, paragraaf 5.3 beschrijft de kwantificering van deze politiek voor de componenten in een samengesteld systeem. De kwantificering van het effect van toestandafhankelijk onderhoud is vooral afhankelijk van de combinatie van de bewaakte component en de gekozen meetmethode. Paragraaf 5.3 voorziet in een illustratie.

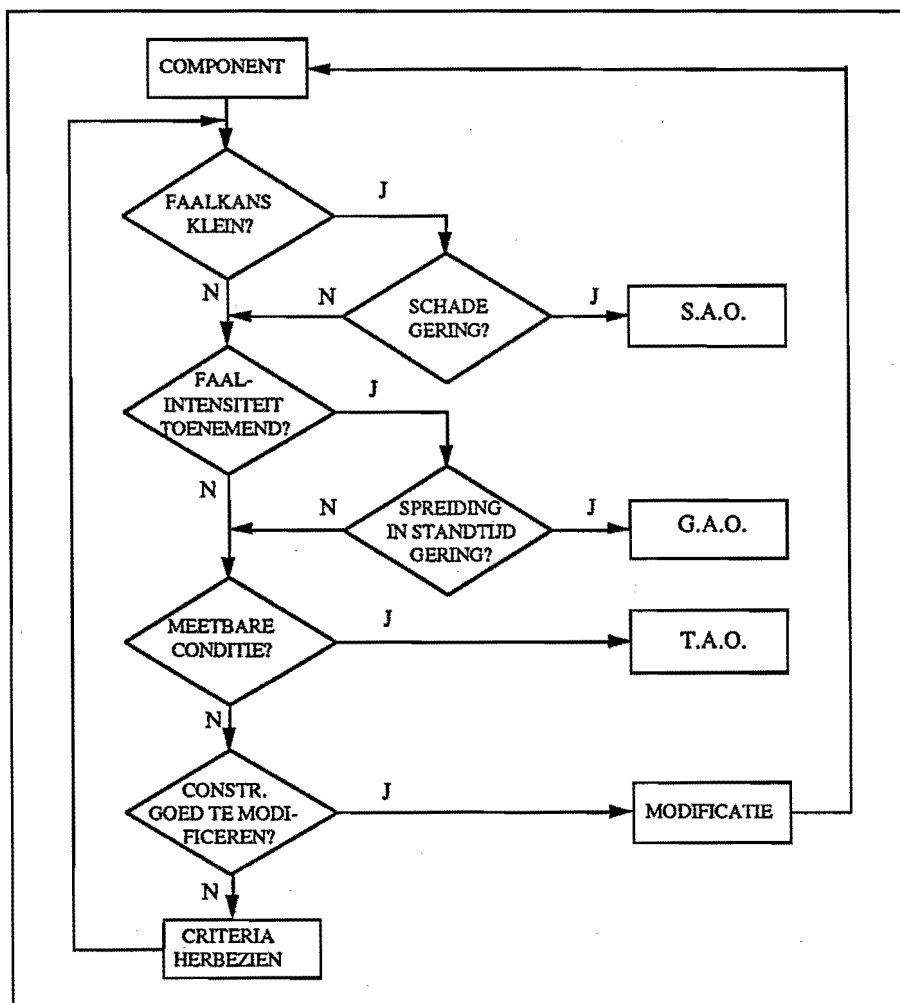
Paragraaf 5.1: Keuze van de onderhoudspolitiek.

Ondanks voortdurende inspanning, zie onder andere Gits [1984], blijkt het ontwerp van een 'optimaal' onderhoudsconcept voor een repareerbaar systeem nog altijd een niet naar tevredenheid opgelost probleem. Waarschijnlijk is het onmogelijk eenmalig het 'optimale' onderhoudsconcept voor een systeem te ontwerpen. Hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te voeren. Dikwijls zal een systeem gedurende zijn levensduur van samenstelling veranderen, bijvoorbeeld door modificaties. Bovendien blijken vaak sterk wisselende invloedsfactoren van buiten de systeemgrenzen belangrijk, bijvoorbeeld de fluctuerende marktsituatie. Verder neemt het scala aan 'gereedschappen' waarover men in het onderhoud kan beschikken toe, met name door de ontwikkelingen in het toestandafhankelijke onderhoud. Aanpassing van het onderhoudsconcept blijft voortdurend actueel.

In veel gevallen is een deel van het onderhoudsconcept voorgeschreven, met name voor het z.g. 'Reliability Centered Maintenance', RCM. Voor onderhoud in het kader van veiligheidsmaatregelen mogen de vereiste (financiële) offers geen factor van belang

zijn. Voor de voorgeschreven delen van het onderhoudsconcept zijn de onderhoudskosten vrijwel alleen nog te beïnvloeden via de onderhoudsorganisatie.

In het overige, 'vrij' te kiezen deel van het onderhoudsconcept, geldt in de meeste gevallen het z.g. 'Cost Optimal Maintenance', COM als doelstelling. Bij de invulling van dit deel moet echter met het RCM rekening gehouden worden, bij de planning bijvoorbeeld.



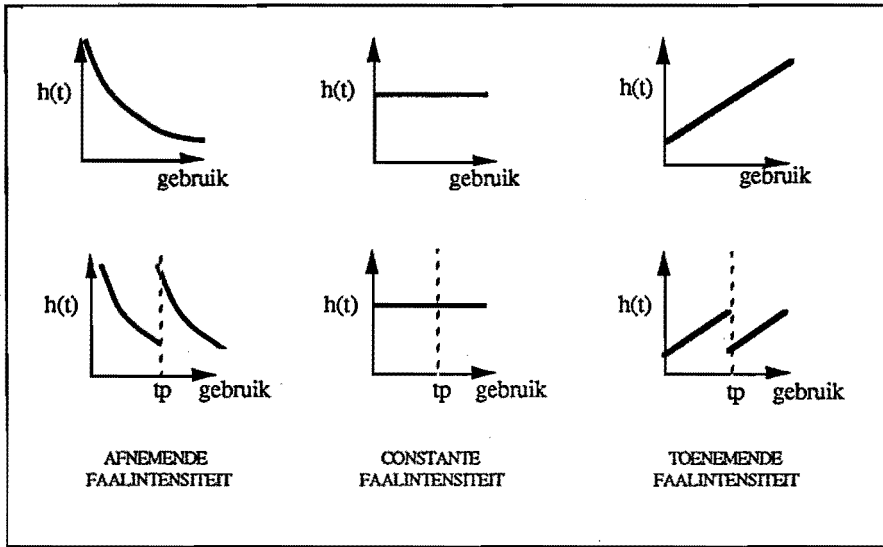
Figuur 5.1: Keuzeschema voor de onderhoudspolitiek, (bron: Van der Mooren 1987).

Zoals gesteld omvat het onderhoudsconcept de keuze in kwalitatieve en kwantitatieve zin van de te volgen onderhoudspolitieken tot op componentniveau. In paragraaf 2.2.1 zijn onderscheiden: storingsafhankelijk onderhoud, S.A.O, gebruiksaafhankelijk onderhoud, G.A.O., en toestandsafhankelijk onderhoud, T.A.O. Voor de selectie van de toe te passen onderhoudspolitiek bestaan verschillende diagrammen, bijvoorbeeld figuur 5.1, naar Van der Mooren [1987]. Onder andere Bleecke en Boersma [1985] publiceerden eerder een soortgelijk schema. De selectie hangt af van een verscheidenheid aan factoren, maar voor een principiële keuze blijken slechts enkele aspecten belangrijk. Dat zijn ten eerste het faalgedrag van de component, in het bijzonder het verloop van de faalintensiteit, ten tweede de verhouding in de kosten voor het uitvoeren van correctief en preventief onderhoud aan een component en ten derde de mogelijkheid tot het verkrijgen van informatie over de toestand (de conditie) van een component.

De geselecteerde politiek moet gekwantificeerd worden, waarbij met de onderlinge afhankelijkheden tussen de componenten rekening gehouden moet worden. Pas als de elementaire politieken in het onderhoudsconcept bijeen zijn gebracht kan een oordeel worden gevormd over het totaal, bijvoorbeeld door simulatie.

Paragraaf 5.2: Gebruiksaafhankelijk onderhoud voor enkelvoudige systemen.

Over keuze en kwantificering van met name G.A.O. is veel literatuur voorhanden. Pierskalla en Volker [1976] presenteren een inventarisatie, en ook een deel van de lijst van 818 artikelen van Sherif [1982] heeft dit probleem als onderwerp. Een bekend resultaat is dat het verloop van de faalintensiteit van de componenten (paragraaf 2.3.1), een eerste indicatie geeft voor de keuze van de toe te passen onderhoudspolitiek. Voor een component met een afnemende of constante faalintensiteit kan S.A.O. of T.A.O. een zinvolle keus zijn. Door preventief ingrijpen vermindert de gemiddelde faalintensiteit, zoals uit figuur 5.2 is af te lezen. G.A.O., maar ook T.A.O. kan een juiste keuze zijn voor componenten met een toenemende faalintensiteit. Dit geldt zowel voor onderhoud gericht op het verbeteren van de bedrijfszekerheid (RCM), als voor onderhoud gericht op het verminderen van de onderhoudskosten (COM). Met de *effectiviteit* van het onderhoud wordt de invloed ervan op het (overall) faalgedrag van een component aangeduid, voor de *efficiëntie* van het uitgevoerde onderhoud zijn de economische consequenties bepalend, zie Geurts [1986].



Figuur 5.2: Effectiviteit van gebruikafhankelijk onderhoud (naar Gits 1984).

Naarmate een component in de standtijd minder spreiding vertoont, kan een effectievere politiek worden gekwantificeerd. Efficiënt kan een onderhoudspolitiek alleen zijn wanneer de preventieve vervanging tevens resulteert in een besparing. Voor de efficiëntie is bepalend de verhouding van de totale kosten voor correctief herstel (C_c) tot de totale kosten voor het uitvoeren van preventief herstel (C_p): de kostenratio (K). Deze kostenratio is de tweede belangrijke indicatie voor de keuze in kwalitatieve en kwantitatieve zin van de verschillende onderhoudspolitieken.

$$K = \frac{C_c}{C_p} = \frac{\text{Totaalkosten voor correctief herstel}}{\text{Totaalkosten voor preventief herstel}} \geq 1 \quad (5.1)$$

In de totaalkosten in teller en noemer moeten zowel de O.U.K als de O.A.K zijn begrepen. In veel gevallen heeft de laatste categorie de overhand. Resumerend geldt dat de voorwaarde voor een effectieve toepassing van G.A.O. een toenemende faalintensiteit is, terwijl voor een efficiënte toepassing een kostenratio van groter dan 1 vereist is.

De uit de literatuur bekende kwantificering van G.A.O. gaat in de meeste gevallen uit van een door een Weibullverdeling te beschrijven faalgedrag van componenten. De flexibiliteit van de verdeling rechtvaardigt een dergelijke keuze. Zoals beschreven in paragraaf 2.4.2, wordt het verloop van de faalintensiteit in een Weibullverdeling uit-

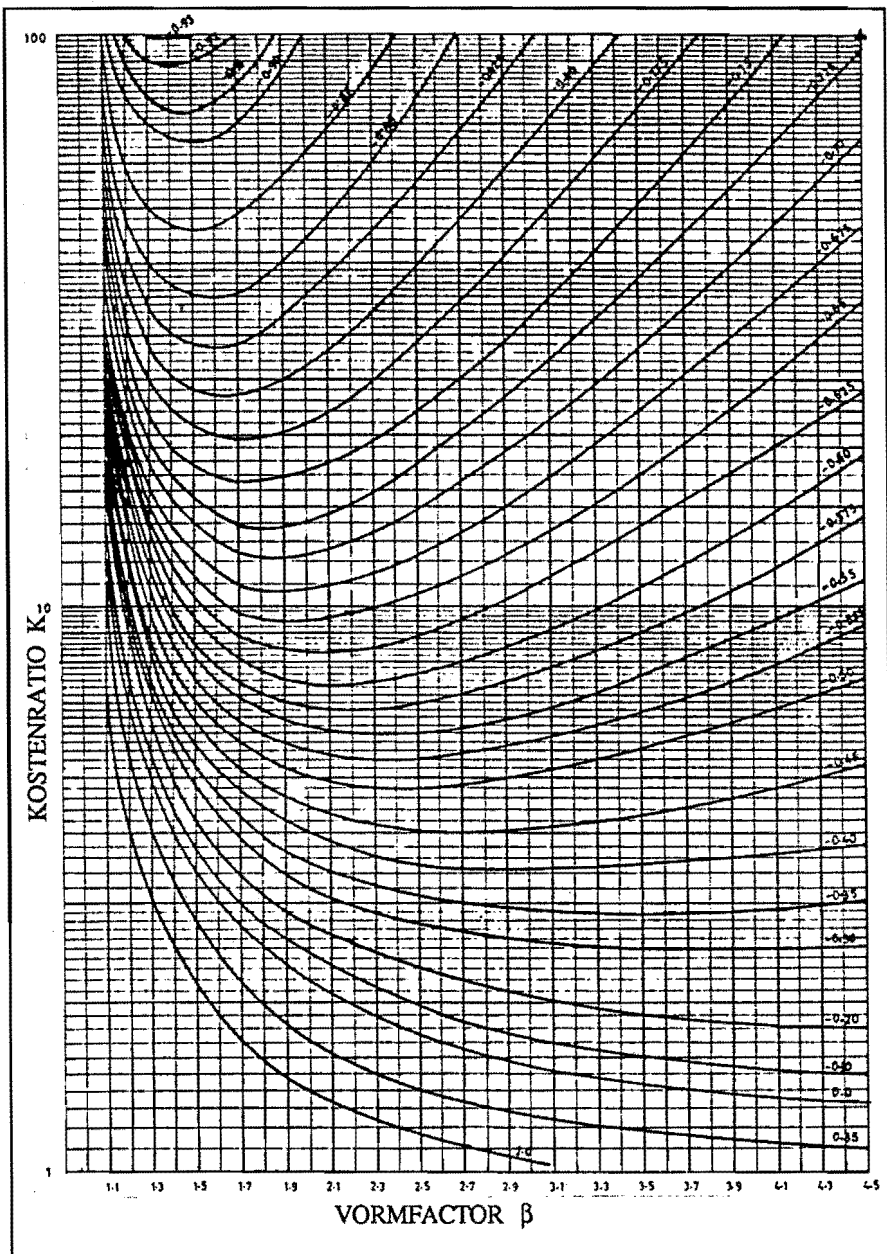
gedrukt in de vormfactor β ; $\beta < 1$ staat voor een dalende, $\beta = 1$ voor een constante en $\beta > 1$ voor een toenemende intensiteit.

Glasser [1969] publiceerde een nadien veel gehanteerd diagram waarmee een optimaal preventief interval kan worden bepaald, uitgaande van de kostenratio en (op indirecte wijze) van de vormfactor uit de Weibullverdeling. Glasser gaat uit van de twee-parameter-verdeling; de minimale standtijd γ is gelijk aan nul. Kabir [1987] presenteert, gebruikmakend van Glassers resultaten een verbeterd diagram, waarin zowel de kostenratio als de vormfactor direkt kunnen worden gebruikt ter bepaling van zowel het optimale interval als de bereikbare efficiëntie. Kabir claimt bovendien nauwkeuriger resultaten, maar gezien de gebruikelijke onzekerheden in zowel de karakterisering van het faalgedrag als de kostenratio heeft dit geen praktische betekenis, zie bijvoorbeeld Geraerds [1985]. Gezien het praktische belang van de diagrammen zijn beide opgenomen als figuur 5.3 en 5.4. Uit figuur 5.3 is een factor z af te lezen, $z = (t_p - \eta) / \eta$. Het optimale gebruiksafhankelijke interval voor G.A.O. is dan $t_p = \eta (1+z)$. Uit figuur 5.4 is af te lezen wat de genormeerde kosten zullen zijn, voor het optimale interval.

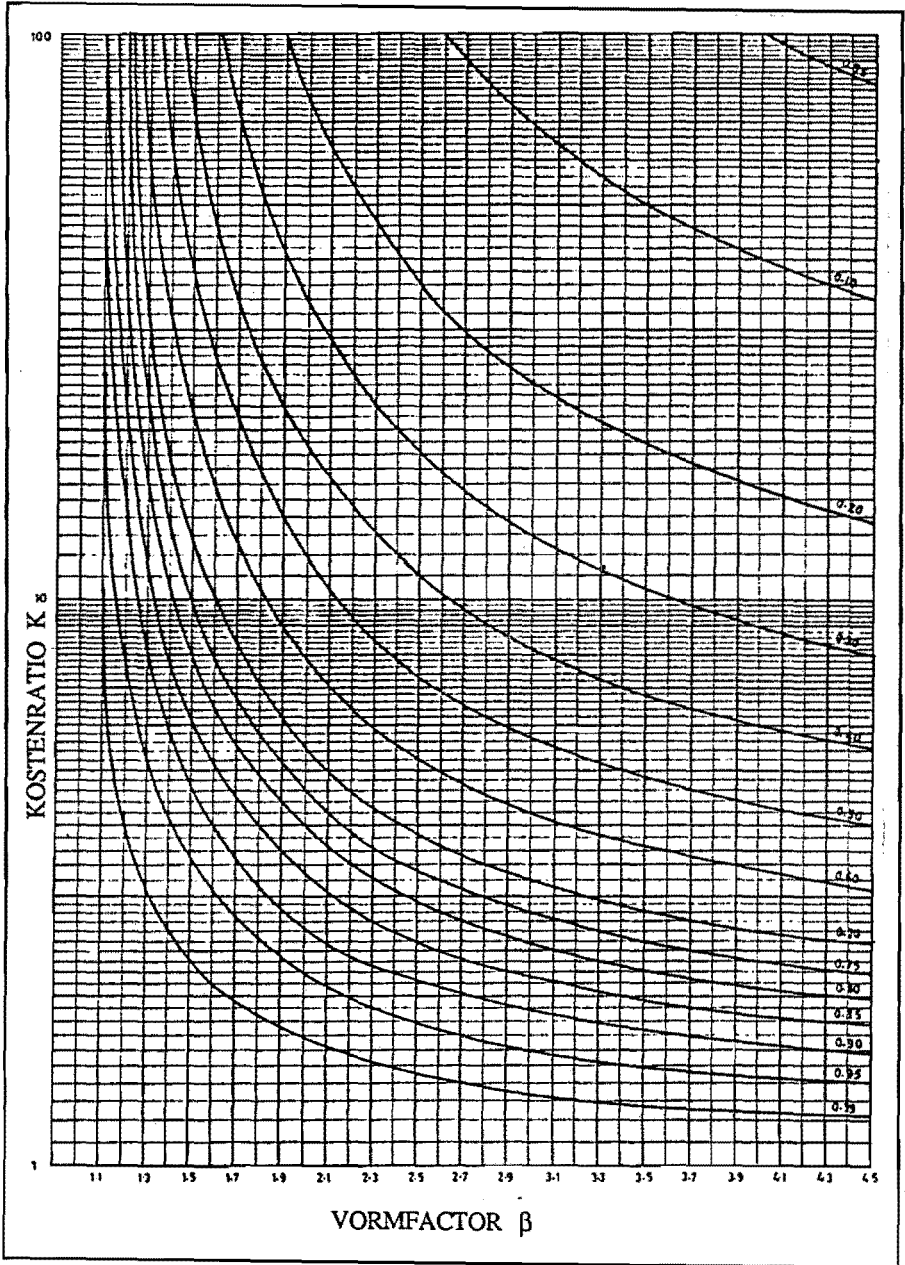
Met behulp van de diagrammen zijn voor componenten met een toenemende faal-intensiteit de volgende belangrijke conclusies te trekken, zoals onder andere door Geurts [1986] is verwoord:

- de in de praktijk gebruikelijke, relatief lage waarden van de vormfactor resulteren in een niet kritisch zijn van het optimale interval: nabij het optimum is de curve vlak,
- de ligging van het optimum blijkt gevoeliger te zijn voor de kostenratio dan voor de vormfactor, zie figuur 5.5.

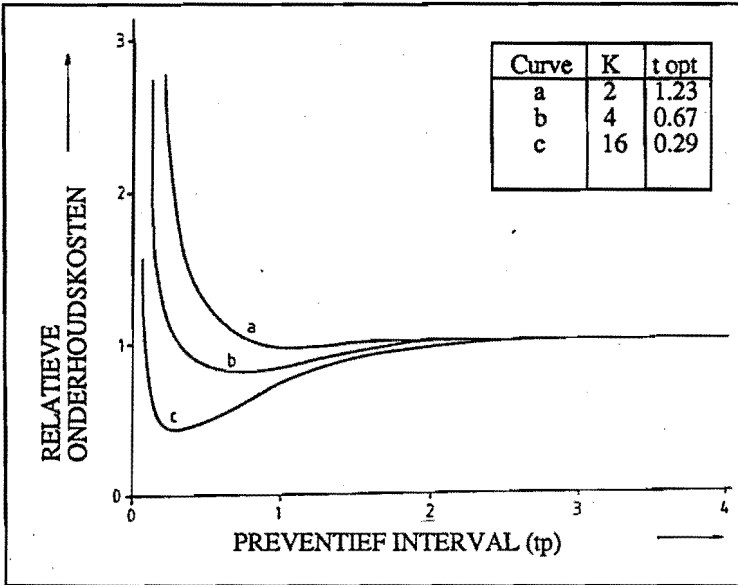
Omgekeerd betekent de vlakke vorm van de curve rond het optimale interval dat (in de praktijk) de bepaling van de vormfactor niet kritisch is, althans voor de gebruikelijke lage waarden van β (praktijk: β_{\max} ca.4-5). De juiste informatie over de hoogte van de kostenratio blijkt belangrijker, ook al omdat voor de kostenratio geen praktische bovengrens aan te geven is.



Figuur 5.3: Curves voor de bepaling van optimaal gebruiksfhankelijk onderhoud, z curves (2 parameter-Weibull-faalverdeling, bron: Kabir 1987).



Figuur 5.4: Genormaliseerde kosten voor optimaal gebruiksfhankelijk onderhoud, ρ curves (2 parameter-Weibull-faalverdeling, bron: Kabir 1987).



Figuur 5.5: Kostenverloop versus preventief interval, voor verschillende kostenratio's, (Weibull, $\gamma=0$, $\beta=2.0$, $\eta=1.0$, naar Geurts 1986).

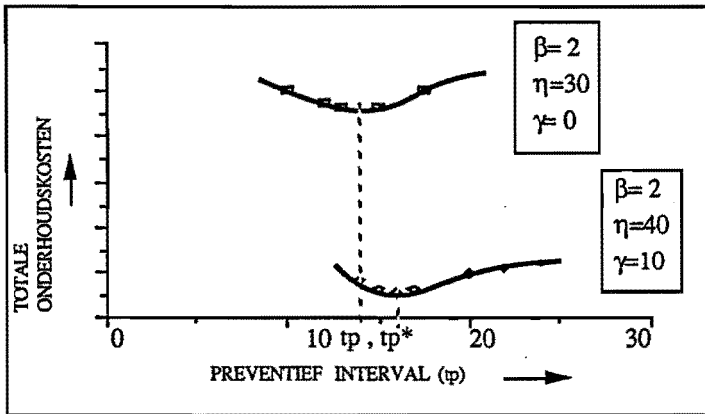
Uit het verloop van de curve concludeert Geurts [1986] verder dat wanneer in de praktijk de kostenratio niet nauwkeurig geschat kan worden, het in het algemeen efficiënter is te rekenen met de lagere waarde. Hierdoor wordt een langer preventief interval berekend. Voor de meeste situaties kan deze uitspraak worden uitgebreid tot de volgende: wanneer preventief onderhoud niet op het als optimaal berekende moment kan worden uitgevoerd is het als regel efficiënter het onderhoud enigszins uit te stellen. Bergman [1985] geeft voor uiteenlopende faalverdelingen een grafische methode aan waarmee inzicht in dit speciale probleem verkregen kan worden.

In een beschouwing van de effectiviteit van de politiek valt op dat de fractie van het aantal storingen dat voorkomen kan worden, door een naar kosten optimaal gekwantificeerde gebruiksaafhankelijke politiek, beperkt is. Dit is het directe gevolg van de gebruikelijke grote spreiding (lage β) in de standtijd. Als *vuistregel* kan gelden dat bij een vormfactor $\beta = 2$, een fractie $1/K$ storingen voorkomen wordt.

Resumerend kan gesteld worden dat met behulp van het diagram Kabir een optimaal preventief interval gevonden kan worden voor een component waarvan het faalgedrag een toenemende faalintensiteit kent, de kostenratio groter dan één is, en waarvoor een minimale standtijd gelijk nul geldt. In combinatie met de faalverdeling geeft de gevonden waarde een indruk van de effectiviteit van de politiek, de efficiëntie blijkt uit een tweede diagram.

Het bestaan van een minimale standtijd is discutabel. Een periode waarin met zekerheid geen falen zal optreden kan meestal niet volledig worden gegarandeerd, maar voorbeelden zijn denkbaar, zoals het faalgedrag van remblokken. Soms zijn op component-niveau meerdere faalmechanismen naast elkaar actief, bijvoorbeeld een inloop- en een slijtageverschijnsel. Vooral in deze situatie kan een betere aanpassing mogelijk zijn wanneer het effect van de slijtage door een Weibullverdeling met een zekere minimale standtijd wordt gemodelleerd, bijvoorbeeld het faalgedrag van banden. Vervangen van een defecte band kan nodig zijn als gevolg van een ingereeden voorwerp maar ook als gevolg van de geleidelijke slijtage van het loopvlak. De minimale standtijd is meestal klein ten opzichte van de karakteristieke standtijd, zodat voor een eerste schatting van een preventief interval de minimale standtijd kan worden genegeerd. Indien noodzakelijk kan deze schatting te allen tijde worden verbeterd, bijvoorbeeld door simulatie.

Het is een misverstand dat het juiste interval kan worden gevonden door sommatie van de minimale standtijd en het optimale interval, bepaald met behulp van een met die minimale standtijd gecorrigeerde karakteristieke standtijd, zie figuur 5.6.



Figuur 5.6: Invloed van de minimale standtijd op het optimale preventie-interval, tp^ .*

Zoals al eerder werd opgemerkt leert de praktijk dat voor de componenten in een onderhoudsmodel in de meeste gevallen het faalgedrag kan worden gemodelleerd door één (Weibull) verdeling. Het aantal gegevens per component is vrijwel altijd zodanig beperkt, dat in het cijfermateriaal eventueel meerdere faalmechanismen niet te onderscheiden zijn. Wanneer bekend is dat falen het gevolg kan zijn van meerdere faal-

mechanismen, dan is het raadzaam dit bij de verzamelde gegevens te noteren, daar anders waardevolle informatie verloren kan gaan, waardoor verkeerde conclusies getrokken kunnen worden.

Zoals is toegelicht in het vorige hoofdstuk is de situatie dat meerdere faalmechanismen op één onderdeel actief zijn, te modelleren door twee (of meer) schijncomponenten, gecombineerd in een faalmoduul. Indien tenminste één van deze componenten een toenemende faalintensiteit vertoont, dan kan voor een (eerste) schatting voor een preventief interval van dit moduul dikwijls nog gebruik gemaakt worden van het diagram in figuur 5.3. Veronderstel dat het moduul is opgebouwd uit twee componenten en dat component II een toenemende faalintensiteit vertoont. Voor component I zijn er dan drie mogelijkheden.

De eerste is dat het faalgedrag van component I gekenmerkt wordt door een afnemende faalintensiteit, een opstartverschijnsel bijvoorbeeld. Het onderdeel heeft een verminderde overlevingskans gedurende een zekere periode na ingebruikname, doch na deze periode laat dit faalmechanisme zich vrijwel niet meer gelden. In deze situatie kan dikwijls worden volstaan met het corrigeren van de kostenratio. Als één van elke N starts resulteert in een direct falen dan wordt de gecorrigeerde kostenratio gelijk aan:

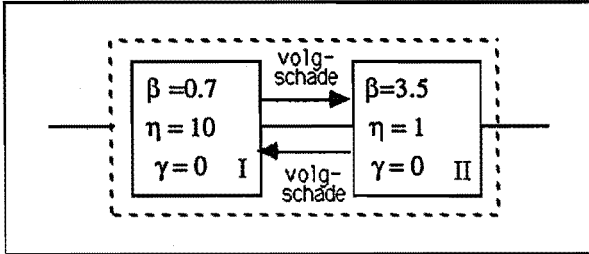
$$K = \frac{\left(C_e + \frac{C_c}{N}\right)}{\left(C_f + \frac{C_e}{N}\right)} \quad (5.2)$$

De tweede mogelijkheid is dat bij de eerste schijncomponent een faalmechanisme actief is dat resulteert in een toevallig faalgedrag. De invloed van deze component is voor de bepaling van het optimale interval niet relevant. De potentiële besparing geldt voor het kostenaandeel van de tweede component.

De derde mogelijkheid doet zich voor als ook component I een toenemende faalintensiteit kent. Dan geldt dat het optimale interval korter is dan dat voor beide componenten apart. Hoewel de invloed zeer aanzienlijk kan zijn, zal niet verder worden ingegaan op deze mogelijkheid. In de praktijk wordt deze situatie niet vaak aangetroffen, althans niet bij componenten in één moduul. Bovendien blijkt dan dikwijls dat één van de mechanismen overheerst.

Een indruk van de waarde van de schatting van het preventie-interval kan verkregen worden door in te zien dat de eerst geschetste situatie ($\beta < 1$) voorziet in een bovengrens, de situatie met $\beta = 1$ geeft een ondergrens. In veel praktische situaties (bijv.

$\beta=0.7$) liggen beide extrema niet ver uiteen. Dit kan worden geïllustreerd met het volgende voorbeeld. De componenten I en II zijn gecombineerd tot een faalmoduul, voor beide componenten geldt een minimale standtijd gelijk nul. Voor de kostenratio wordt de waarde 10 verondersteld.



Figuur 5.7: Tweecomponents faalmoduul.

De ondergrens voor het preventie-interval t_p volgt uit de kostenratio en de parameters van component II: $t_p = 0.41 \eta_{II}$. De bovengrens wordt gevonden door de kostenratio te corrigeren. Wanneer alleen S.A.O. wordt gevolgd blijkt dat component I verantwoordelijk is voor ca. 1/6 van de storingen. Dit leidt tot een gecorrigeerde kostenratio $K^* = 4.4$, resulterend in $t_p = 0.48 \eta_{II}$. Door simulatie kan het feitelijke optimum beter worden benaderd, $t_{opt} = 0.45 \eta_{II}$. Ook het verschil in efficiëntie blijkt voor het gevonden optimum in relatie tot de beide uitersten gering.

In de uitzonderlijke situatie dat meer dan twee Weibullverdelingen vereist zijn voor de juiste beschrijving van het faalgedrag van een enkel te modelleren onderdeel (b.v. een badkuipcurve), dan kan in de schatting van het preventie-interval de invloed van het faalmechanisme dat gekenmerkt wordt door een constante faalintensiteit steeds worden genegeerd. In de bepaling van de efficiëntie van de politiek is de invloed van dit faalmechanisme natuurlijk niet te verwaarlozen.

Conclusie: voor enkelvoudige systemen met een faalgedrag dat kan worden gemodelleerd door één of meer Weibullverdelingen, is een praktisch waardevolle schatting voor het preventie-interval mogelijk. De invloed van een tweede faalmechanisme op zowel de effectiviteit als de efficiëntie mag niet altijd genegeerd worden. Voor de kwantificering van het te kiezen interval kan echter een, in de meeste gevallen voldoende nauwkeurige, eerste schatting worden opgemaakt uit de (voor de Weibullverdeling) aangegeven diagrammen. In alle gevallen is door simulatie een schatting te verkrijgen

Paragraaf 5.3: Gebruiksafhankelijk onderhoud voor samengestelde systemen.

Voor de keuze en met name de kwantificering van G.A.O. voor een samengesteld systeem gelden afwijkende regels, als gevolg van de afhankelijkheden tussen de componenten. Vooral economische afhankelijkheid, zie paragraaf 2.2.2 kan aanleiding geven tot opportunistisch onderhoud.

Sinds Radner en Jorgenson [1962] en McCall [1965] de terminologie introduceerden, is veel (toegepast) onderzoek gedaan naar deze vorm van preventief onderhoud en de kwantificering ervan. Zie bijvoorbeeld de publicatie van Liang [1985]; in een onderzoek naar het onderhoudsgedrag van copiëermachines gaf hij de opportunistische politiek de naam 'piggy-back practice' mee.

Voor een component met een geschikt faalgedrag en een kostenratio groter dan 1, kan een optimaal preventie-interval t_p worden bepaald. Wanneer de vervanging van deze component gecombineerd wordt uitgevoerd met de vervanging van een tweede, dan behoeven in de bepaling van de kostenratio voor deze tweede component slechts de extra kosten te worden verrekend. Dit heeft als gevolg een (veel) hogere ratio en als consequentie een korter preventie-interval. Op deze wijze zijn voor componenten waarvoor G.A.O. effectief is, in de kwantificering twee waarden toe te kennen; t_p voor gepland G.A.O., waarbij alle kosten op de te vervangen component drukken en t_o voor het opportunistische G.A.O.

Een dergelijke (t_o, t_p) politiek is door Radner [1962] onderzocht voor de situatie waarin de faalintensiteit van één van beide componenten constant is. Bouzitat [1962] analyseert de situatie voor $K = 1$, de correctieve en preventieve stop zijn even duur. In deze situatie is gepland, preventief onderhoud niet zinvol, zodat opportunistisch onderhoud slechts efficiënt kan worden uitgevoerd in combinatie met een faalgebeurtenis: *correctief opportunistisch onderhoud*. De algemene situatie waarin voor beide componenten een preventieve politiek effectief kan zijn is onderzocht door Vergin en Scriabin [1977]. Zowel correctieve als preventieve systeemstops kunnen tevens worden benut voor het uitvoeren van opportunistisch onderhoud, de tweede categorie is het *preventief opportunistisch onderhoud*.

Het preventie-interval t_p kan lang zijn in relatie tot de totale systeemlevensduur. Dit betekent dat preventief onderhoud aan deze component alléén nooit zinvol zal zijn. Ook de t_o kan extreem zijn en bijvoorbeeld bijna de waarde nul krijgen. In het limietgeval gaat opportunistisch onderhoud over in onvoorwaardelijke volgherstel. Dit betekent dat de component bij elke gelegenheid zal worden vervangen. In de praktijk betreft dit voor-

al goedkope, snel slijtende onderdelen als keerringen, lagers, etc. Dit zijn onderdelen waarvoor in geval van een opportunistische vervanging de kostenratio hoog is, de feitelijke waarde van de vormfactor doet dan minder terzake (mits $\beta > 1$).

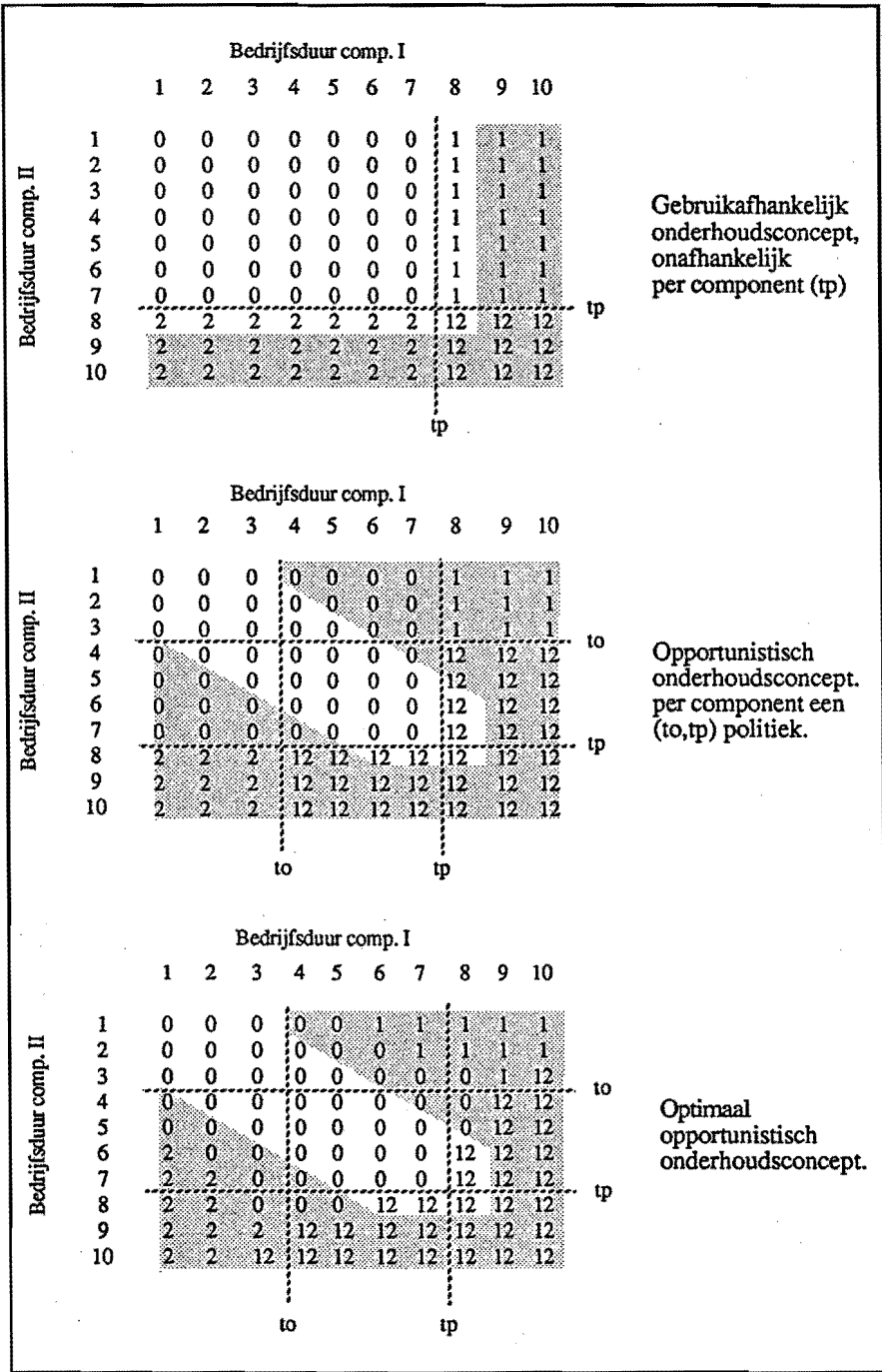
Ter illustratie van de ogenschijnlijke complexiteit van G.A.O. kan worden verwezen naar Vergin en Scriabin [1977]. Gezien het belang van de door hen opgestelde conclusies zal het onderzochte hier kort worden toegelicht, zie figuur 5.8. Het beschouwde model bestaat uit twee (identieke) componenten. Het faalgedrag is beschreven door een analytisch toegankelijke Erlangverdeling met een toenemende faalintensiteit.

Alleen G.A.O. wordt toegepast, maar deze politiek is dus voor beide componenten effectief. De aan elke combinatie van acties verbonden kosten worden bekend verondersteld. Er wordt aangetoond dat een onderhoudsconcept opgebouwd uit de elementaire regels niet exact juist is, maar dat de afwijking van het werkelijk optimale concept beperkt blijft. Dit resultaat kan worden afgeleid uit figuur 5.8, waarin voor het uit twee componenten opgebouwde systeem voor verschillende politieken het rekenresultaat is weergegeven.

De eerste figuur geeft de situatie weer van een onderhoudsconcept zonder opportunistisch onderhoud, waarbij alleen het geplande preventieve onderhoud conform de gevonden t_p waarden wordt uitgevoerd. Voor beide componenten is de t_p gelijk aan 8 perioden. De tweede figuur geeft het (t_0, t_p) -concept weer. In dit voorbeeld is de t_0 voor beide componenten bepaald op 4 perioden. De derde figuur geeft het voor elk van de mogelijke combinaties in bedrijfsduren doorgerekende, werkelijk optimale concept. Hierbij valt op dat de t_p varieert tussen de 6 en 9 perioden, terwijl de t_0 zelfs kan verminderen tot 3 perioden.

De logische verklaring is eenvoudig. De (vroegtijdige) vervanging van alleen een 6 of 7 perioden oude component I, in de situatie waarin component II nog relatief nieuw is (bedrijfsduur 1-2 perioden), resulteert in een voldoende vermindering van de kans op systeemuitval in de eerstvolgende perioden om de vervanging te verantwoorden.

Heeft component II echter een bedrijfsduur gerealiseerd van 3-5 perioden dan is het effect te gering om vervanging te verantwoorden. Het blijkt in deze situatie aantrekkelijk het preventieve onderhoud aan component I enigzins uit te stellen, totdat beide componenten de gebruiksduur hebben bereikt waarbij gezamenlijke vervanging verantwoord is.



Figuur 5.8: Gebruikafhankelijke onderhoudspolitieken (bron: Vergin, e.a. 1977).

Alleen als component II al een relatief hoge gebruiksduur heeft bereikt van 6-7 perioden, blijkt de met behulp van de voor de elementaire situatie opgestelde regels berekende t_p juist. Door de symmetrie in het model is ook figuur 5.8 volledig symmetrisch.

De conclusie kan dus zijn dat in de bepaling van het optimale concept rekening gehouden moet worden met de momentane leeftijd van elk van de overige componenten en daarmee lijken de met de elementaire regels bereikbare resultaten ontoereikend. Deze conclusie en de complexe vorm van het werkelijk optimale concept maken duidelijk dat een analytische benadering van het probleem niet eenvoudig zal zijn. Een nadere beschouwing van de resultaten leert echter dat een groot deel van de berekende leeftijdcombinaties bij een consequente toepassing van de optimale politiek niet bereikt kunnen worden. Slechts het in figuur 5.8 niet gearceerde deel van de leeftijdcombinaties is relevant, daar lijkt geen verschil te bestaan in het optimale en het (t_0, t_p) concept. Natuurlijk wordt dit mede veroorzaakt door de discrete opdeling in bedrijfsduurcombinaties, maar het werkelijke verschil zal klein zijn.

Vergin en Scriabin onderzochten eveneens een model bestaande uit 3 componenten. Het aantal bedrijfsduurcombinaties neemt hierin sterk toe, maar eveneens de mogelijkheden tot het uitvoeren van opportunistisch onderhoud. In het artikel komen zij tot de conclusie dat ook voor de meer complexe situatie er weinig verschil bestaat in het werkelijk optimale gebruiksafhankelijke concept en het (t_0, t_p) concept zoals dat oorspronkelijk door Radner [1962] werd ingevoerd.

Van de wetenschap dat een (t_0, t_p) politiek (vrijwel) overeenkomt met de werkelijk optimale politiek kan in de praktijk gebruik gemaakt worden, want beide waarden t_0 en t_p zijn relatief eenvoudig te bepalen. Eventueel kunnen nauwkeuriger resultaten worden verkregen door de gevonden t_0 en t_p als startwaarden te gebruiken in het simulatiemodel. Het belang van opportunistisch onderhoud wordt onderstreept door de eveneens berekende potentiële besparingen ten opzichte van een concept dat alleen het geplande preventieve onderhoud omvat. De resultaten zijn afhankelijk van de ingevoerde financiële informatie, maar in alle gevallen blijkt een toenemende complexiteit van een systeem te resulteren in een eveneens toenemend (economisch) belang van het opportunistische onderhoud!

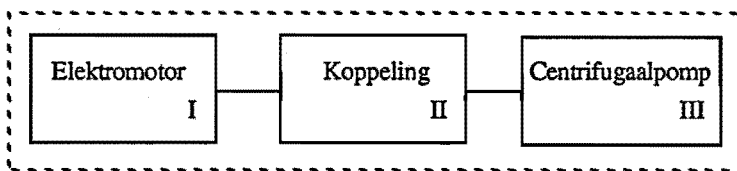
In de vorige paragraaf is geconstateerd dat t_p met name door de grote spreiding in de geconstateerde reële standtijden tot falen, niet kritisch is. Voor de t_0 geldt het zelfde. In de onderhoudspraktijk geeft dit de mogelijkheid binnen zekere grenzen te 'schuiven' met het opportunistische onderhoud, bijvoorbeeld om een evenwichtiger werklast te verkrijgen.

Paragraaf 5.4: Illustratie.

Het in hoofdstuk 4 geïntroduceerde model en de theorie uit de voorgaande paragrafen zal worden geïllustreerd met een eenvoudig voorbeeld. Als object is een pompaggregaat gekozen. Nadat het kwalitatieve en kwantitatieve aandeel in de modelbouw is voltooid, worden verschillende onderhoudsconcepten geformuleerd en het systeemgedrag gesimuleerd. Als eerste een onderhoudsconcept dat slechts S.A.O. voorschrijft, dan via G.A.O en T.A.O naar een gecombineerd S.A.O./G.A.O./T.A.O concept. Steeds zullen enkele illustratieve simulatieresultaten worden vergeleken.

Paragraaf 5.4.1 Kwalitatieve en kwantitatieve modelbouw.

De systeemgrenzen omvatten de pompinstallatie, zoals deze is gemonteerd op het frame, figuur 5.9. Daarbuiten vallen onder andere de pijpansluitingen, leidingen, afsluiters e.d., alsmede de elektrische voeding, schakeling, etc. Het object is opgebouwd gedacht uit een elektromotor als aandrijving, een centrifugaalpomp en tussen beide een mechanische koppeling. De overige onderdelen, als het frame etc., worden niet gemodelleerd omdat de ervaring leert dat hun bijdrage tot het systeemgedrag te verwaarlozen is.



Figuur 5.9: Systeemgrens en opdeling.

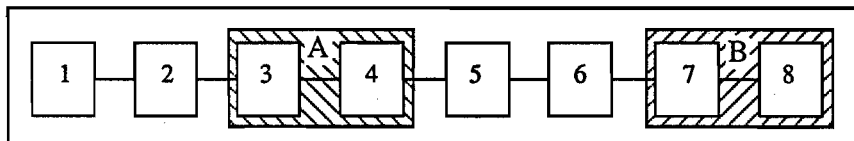
In de praktijk blijken de elektromotor en de koppeling als eenheid te worden verwisseld door een reserve-exemplaar, om eventueel elders gerepareerd te worden. Beide onderdelen worden in het model als componenten opgenomen. De centrifugaalpomp kan worden opgedeeld in een aantal kleinere onderdelen: een asafdichting, twee indentieke lagers en de waaier. Binnen het pompdeel zijn dit de kleinste als eenheid te vervangen delen, relevant in het onderhoud. Het systeemmodel omvat daarmee 6 componenten.

Voor de beschrijving van het faalgedrag wordt uitgegaan van Weibullverdelingen.

Uit de aanwezige informatie over het faalgedrag kan worden opgemaakt dat voor de asafdichting twee relevante faalmechanismen te onderscheiden zijn. Het eerste is te herkennen als een inloop- of montageverschijnsel, gekenmerkt door een afnemende faalintensiteit ($\beta=0.5$), het tweede mechanisme betreft slijtage ($\beta=2.0$). Voor de modellering zijn twee schijncomponenten gebruikt. In de praktijk zou de asafdichting een 'mechanical seal' kunnen zijn, een storingsgevoelig onderdeel, waarbij vooral de montage kritisch is.

Uit de gegevens van de waaier blijkt dat eveneens twee faalmechanismen te onderscheiden zijn. Het eerste wordt gekenmerkt door een toevallig patroon ($\beta=1.0$), dat het gevolg kan zijn van het uitbreken van waaierschoepen door grove verontreinigingen in de processtroom. Het tweede is de voor het proces gebruikelijke degradatie door erosie ($\beta=2.5$). Zie tabel 5.1 voor de overige ingevoerde waarden.

Zo wordt een in totaal 8 componenten tellend model samengesteld, figuur 5.10. Alle componenten zijn in serie geschakeld. De schijncomponenten 3 en 4, samen de afdichting, zijn gecombineerd in moduul A. De componenten 7 en 8 modelleren de waaier, moduul B. Binnen de modulen geldt onvoorwaardelijk volgherstel.



Figuur 5.10: Systeemmodel.

Voor de beschrijving van het herstelgedrag worden deterministische waarden als onderhoudsduur gehanteerd. Een preventieve actie vergt 25 % minder tijd dan de vergelijkbare correctieve. Per manuur voor onderhoud is met een bedrag van Hfl. 80.- gerekend. Alle onderhoudsacties kunnen door één persoon uitgevoerd worden. De onderhoudsafhankelijke kosten bedragen voor een ongeplande stop Hfl. 500.-/uur en voor een geplande stop Hfl. 100.- per uur.

Component Nummer		Weibull-faalverdeling			Reparatie/Herstel		Materiaal kosten [Hfl]
		min.levens- duur [uur]	vormfactor [-]	standt.[uur]	corr. [uur]	prev. [uur]	
1	El.motor	0	1.0	70000	2.0	1.5	1500
2	koppel.	0	2.0	40000	3.0	2.3	100
3	afdicht.	0	0.5	50000	4.0	3.0	700
4		10000	2.0	40000			
5	lager 1	0	3.5	130000	6.0	4.0	35
6	lager 2	0	3.5	130000	6.0	4.0	35
7	waaier	0	1.0	25000	6.5	4.3	700
8		0	2.5	80000			

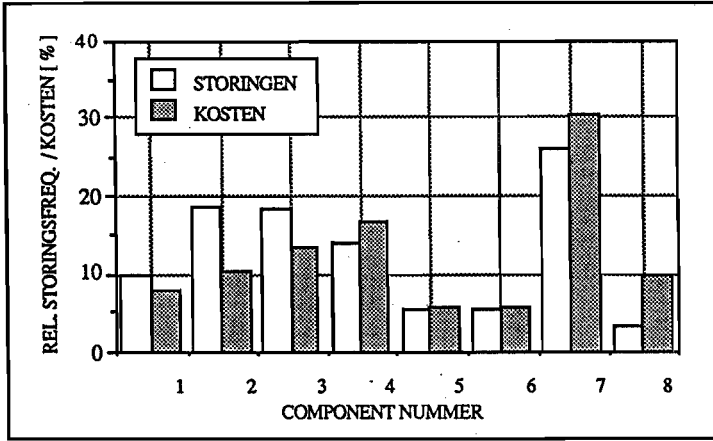
Tabel 5.1: Invoergegevens: het faal- en herstelgedrag en de materiaalkosten.

Voor de systeemlevensduur is een periode van 10 jaar aangenomen. In totaal worden per simulatie 5000 runs gesimuleerd, waardoor de kostencalculatie voor de meeste simulaties met 90 % zekerheid tot op 1,3 % nauwkeurig is. Voor 1000 runs is dat met 90 % zekerheid tot op circa 3% nauwkeurig. De praktische relevantie van de verkregen resultaten staat niet ter discussie. Het doel van deze illustratie is niet te demonstreren hoezeer verschillend de diverse onderhoudsconcepten uitwerken op het systeemgedrag en/of de onderhoudskosten, maar om de bruikbaarheid en de gedetailleerde mogelijkheden van het model te verduidelijken.

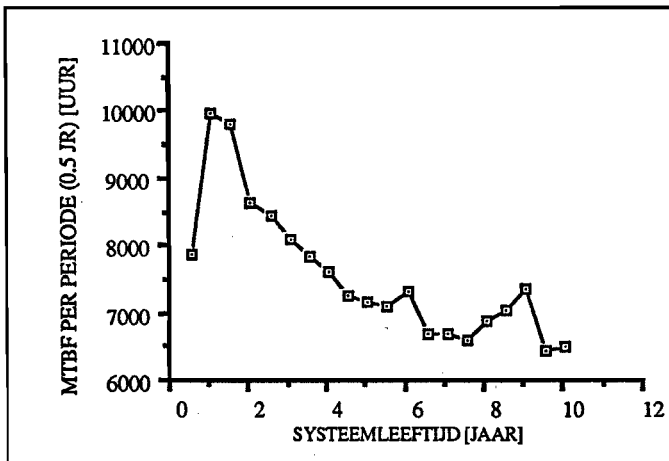
Paragraaf 5.4.2 Storingsafhankelijk onderhoud.

Het eerste gesimuleerde onderhoudsconcept, concept I, is uitsluitend storingsafhankelijk. Dit concept resulteert in een MTBF van 7340 uur (90%: 7297-7388). Figuur 5.11 geeft de verdeling van de frequentie en de kosten aan, zoals deze worden toegerekend naar de verschillende componenten. De asafdichting, de componenten 3 en 4, en de waaier, de componenten 7 en 8, zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van zowel de storingen als de kosten. Gemiddeld worden de totaalkosten over een jaar berekend op Hfl. 3840 (90%: 3816-3866).

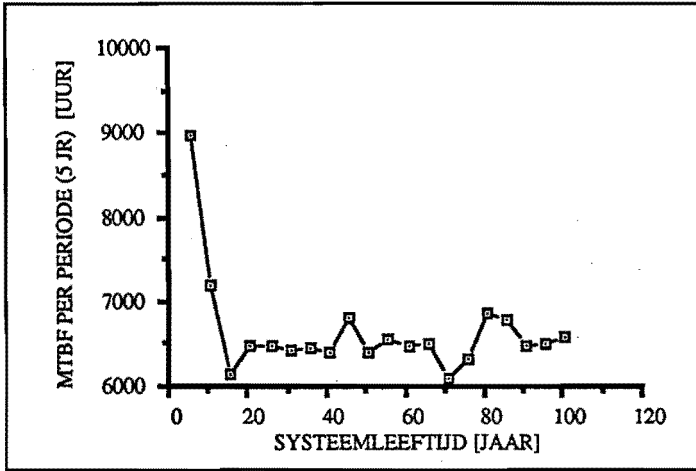
Uit de simulatieresultaten blijkt dat de MTBF niet constant is over de totale systeemlevensduur. Figuur 5.12 toont aan dat de dikwijls a priori veronderstelde evenwichtstoestand in dit geval pas na circa 10 jaar zal worden bereikt. Een simulatie met een systeemlevensduur van 100 jaar (100 runs) bevestigt dit, zie figuur 5.13. In ieder geval is de periode lang in vergelijking met de in de industrie gebruikelijke levensduur van technische systemen.



Figuur 5.11: Storingsfrequentie en kosten per component.



Figuur 5.12: MTBF als functie van de tijd. Systeemlevensduur 10 jaar.



Figuur 5.13: MTBF als functie van de tijd. Systeemlevensduur 100 jaar.

Paragraaf 5.4.3. Gepland gebruiksaafhankelijk onderhoud.

Vervolgens is voor alle daarvoor geschikte componenten ($\beta > 1$, $K > 1$) een G.A.O. als onderhoudspolitiiek gekozen. Voor de kwantificering van de te hanteren preventie-intervallen is gebruik gemaakt van het diagram van Kabir [1987], figuur 5.3, met het volgende resultaat.

Onderdeel	Component nummer	preventie interval, t_p [uren].
Koppeling	2	21600
Asafdichting	4 (3)	36000
Lager	5	70200
Lager	6	70200
Waaier	8 (7)	68000

Tabel 5.2: Preventief interval, t_p .

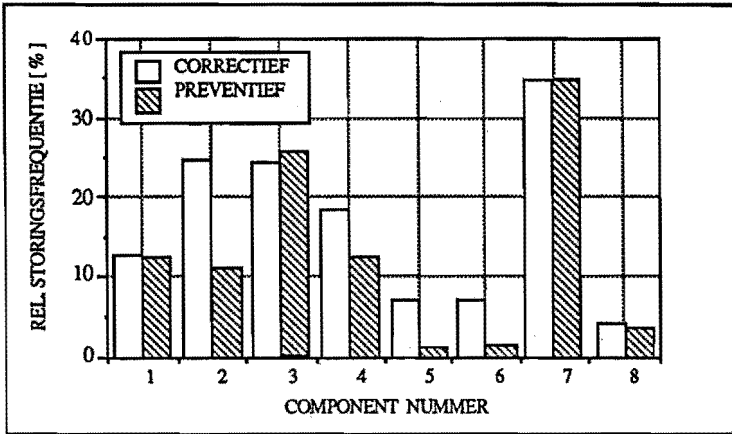
Met deze informatie is een onderhoudsconcept opgesteld dat in de simulatie is opgenomen. De systeemlevensduur is 10 jaar, het aantal runs 5000. Clustering van onderhoud is niet gesimuleerd. Een aantal relevante simulatieresultaten van de verschillende concepten is in tabel 5.3 weergegeven.

Dit onderhoudsconcept resulteert in een MTBF van circa 8130 uur (90%: 8077-8189). Dit is een verbetering ten opzichte van het vorige resultaat, maar daartegenover staat wel een zekere preventieve inspanning, met als gevolg een flink toegenomen onderdelenverbruik (ca. 34%). Opvallend is dat de gesimuleerde kosten niet significant verschillen: Hfl. 3840 (90%:3816-3865) voor S.A.O. tegenover Hfl. 3850 (90%:3826-3874) voor het G.A.O.-concept.

Concept nummer	Benaming	Aantal opport. per jaar.	Aantal vervang. per jaar.	MTBF [uur]	MTBM [uur]	MTBPM [uur]	Kosten gem./run [Hfl.]
I	S.A.O.	-	1.18	7340	7340	-	3840
II	G.A.O.	-	1.58	8130	5585	14355	3850

Tabel 5.3: Rekenresultaten, onderhoudsconcept I en II.

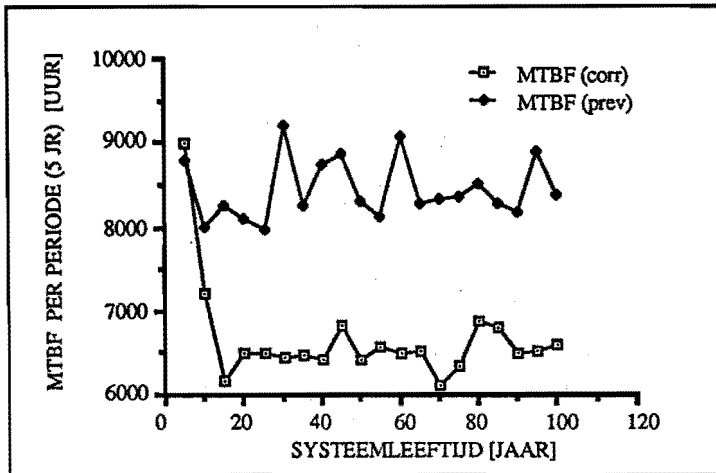
Preventief onderhoud vergt extra uitgaven, die over een wat langere termijn moeten worden terugverdiend. Een aantal componenten blijkt een redelijke kans te hebben zonder storing het einde van de systeemlevensduur te bereiken. Wanneer voor deze componenten een preventieve politiek wordt gekozen, dan zijn in een deel van de gevallen de uitgaven nutteloos geweest. Het voorbeeld maakt dit duidelijk zichtbaar; over een systeemlevensduur van 10 jaar blijkt het gesimuleerde preventieve onderhoud niet zinvol. Het totale financiële resultaat is nihil! Het duidelijkst wordt dit geïllustreerd door het gedrag van beide lagers. In de situatie waarin slechts correctief onderhoud wordt gepleegd, wordt door ongeveer driekwart van de lagers zonder storing de systeemlevensduur bereikt. Door de preventieve politiek neemt het aantal storingen aan de lagers weliswaar af, met circa 90 %, maar geen enkel oorspronkelijk gemonteerd exemplaar bereikt nog het einde van de systeemlevensduur. Figuur 5.14 toont de effectiviteit van dit G.A.O.-concept.



Figuur 5.14: Beïnvloeding van het storingsgedrag voor onderhoudsconcept I en II, per component.

Het aantal storingen veroorzaakt door de componenten 1 en 7 blijft stabiel, conform de verwachting ($\beta=1$). De beide lagers vormen aanzienlijk minder vaak een storingsoorzaak. Door hun relatief hoge vormfactor ($\beta=3.5$) is het G.A.O. effectief. In iets mindere mate geldt dat ook voor component 2 ($\beta=2.0$). Component 8 bereikt slechts zelden een dusdanig hoge leeftijd dat hiervoor G.A.O. aan de orde is; ondanks de betrekkelijk hoge vormfactor ($\beta=2.5$) is de invloed van moduul B op het totale faalgedrag minimaal. Moduul A geeft een verminderde storingsfrequentie als gevolg van falen van component 4, maar door het toegenomen aantal vervangingen (met ruim 11 %) zal het montageverschijnsel, gemodelleerd door component 3, vaker optreden.

In een oriënterende simulatie met een systeemlevensduur van 100 jaar is de verwachte verbetering in systeemgedrag en in kostenniveau duidelijk. De MTBF verbetert tot 8330 uur (90%:8272-8391), terwijl de totale kosten per jaar gemiddeld circa Hfl. 3990,- bedragen, tegen Hfl. 4280,- voor het uitsluitend S.A.O.; dit ondanks een met 27 % toegenomen verbruik aan onderdelen. Er blijkt eveneens invloed te bestaan op het bereiken van de gedragsevenwichtssituatie. Door de hogere wisselfrequentie van veel van de onderdelen wordt het evenwicht in het systeemgedrag iets eerder bereikt, maar duidelijk op een ander, veel hoger gelegen niveau, zie figuur 5.15.



Figuur 5.15: Systeemgedrag, MTBF per periode (5 jaar).

Paragraaf 5.4.4: Opportunistisch gebruiksafhankelijk onderhoud.

In de formulering van een opportunistisch onderhoudsconcept moet rekening gehouden worden met de praktische mogelijkheden, zoals deze door het object worden bepaald. In dit systeem geldt bijvoorbeeld dat, als de elektromotor defect is geraakt en vervangen moet worden, alleen de koppeling voor opportunistisch onderhoud in aanmerking komt. Het pompdeel zal niet worden gedemonteerd. Indien echter één van de pomplagers defect is geraakt, dan zijn in principe alle overige componenten toegankelijk. Tabel 5.4 geeft een overzicht van de mogelijkheden en beperkingen zoals deze zijn opgenomen in het model.

Er kan gekozen worden voor een concept waarin opportunistisch onderhoud alleen wordt uitgevoerd in geplande, preventieve systeemstops, onderhoudsconcept III-A, of alleen in correctieve systeemstops, concept III-B, of in beide gevallen; dit laatste is gemodelleerd als concept III-C.

De clustering van onderhoud, zoals met concept III-A wordt gesimuleerd, is in iedere onderhoudspraktijk gebruikelijk en kan tevoren worden gepland, zie de methoden van Kelly [1984] en Gits [1984].

Concept III-B impliceert dat geen enkele preventieve stop zal worden uitgevoerd. Voor de uitvoering van alle preventieve onderhoud wordt gewacht op een geschikte gelegenheid, veroorzaakt door een storing aan een andere component. Vooral als het gemodelleerde systeem een niet kritisch deel vormt in een (productie)proces lijkt dit laatste aantrekkelijk, omdat de onderhoudsfrequentie naar alle waarschijnlijkheid het laagst is.

Concept III-C is een combinatie van III-A en III-B; elke gelegenheid, correctief en preventief kan worden benut voor opportunistisch onderhoud.

Onderdeel	Component nummer.	mogelijk opportun. onderhoud aan comp. nummer:	
		Prevent.	Correct.
Elektromotor	1	2	2
Koppeling	2	-	-
Asafdichting	3	-	2,5,6,8
	4	2,5,6,8	2,5,6,8
Lager	5	2,4,6,8	2,4,6,8
Lager	6	2,4,7,8	2,4,7,8
Waaier	7	-	2,4,5,6
	8	2,4,5,6	2,4,5,6

Tabel 5.4: Mogelijkheden tot opportunistisch onderhoud.

Zoals in paragraaf 4.6 is aangeduid, is het bepalen van de stopduur voor de gecombineerde actie een moeilijk oplosbaar probleem. Voor het hier gemodelleerde systeem lijkt het redelijk de stopduur gelijk aan de langste herstelduur van de in de stop te vervangen componenten te kiezen. In een eerste schatting van het opportunistische interval t_0 is in de bepaling van de voor deze situatie geldende kostenratio voor de C_p uitgegaan van alleen de materiaalkosten. Dit resulteert dan in de volgende waarden van t_0 , zie tabel 5.5.

Onderdeel	Component nummer.	Opportunist. interval, t_0 [uren].
Koppeling	2	10800
Asafdichting	4 (3)	22800
Lager	5	27300
Lager	6	27300
Waaier	8 (7)	32800

Tabel 5.5: *Opportunistisch interval, t_0 .*

Elk van de geformuleerde concepten is gesimuleerd met een systeemlevensduur van 10 jaar. Enkele van de resultaten staan vermeld in tabel 5.6. Ter vergelijking zijn de resultaten uit de eerste simulaties toegevoegd.

Concept nummer	Benaming	Aantal opport. per jaar.	vervang. per jaar.	MTBF [uur]	MTBM [uur]	MTBPM [uur]	Kosten gem./run [Hfl.]
I	S.A.O.	-	1.18	7340	7340	-	3840
II	G.A.O.	-	1.58	8130	5585	14355	3850
III-A	Prev. opp.	0.37	1.62	8150	6280	20575	3870
III-B	Corr. opp.	1.00	1.81	8655	8655	-	3945
III-C	P&C. opp.	1.12	1.90	8430	7660	35430	3960

Tabel 5.6: *Rekenresultaten, onderhoudsconcept III-A, III-B en III-C.*

Het concept III-A verschilt met B en C voornamelijk in het aantal gelegenheden dat beschikbaar is voor het uitvoeren van opportunistisch onderhoud. Het aantal stops voor preventief onderhoud neemt onmiddellijk sterk af als opportunistisch onderhoud wordt uitgevoerd, III-A resulteert in nog maar 67 % van het met concept II gesimuleerde aantal. Wanneer ook de correctieve gelegenheden worden benut, vermindert het aantal geplande stops nog veel verder, tot slechts 28%. Het blijkt dat in concept III-C alleen nog de koppeling en de afdichting aanleiding geven tot een aantal geplande stops.

Concept III-A resulteert in een hogere MTBF: 8150 uur (90%: 8093-8207). Vergelijken met het S.A.O is echter de totale onderhoudsfrequentie toegenomen: de MTBM is 6280 (90%:6247-6313). De resultaten van de kostenrekening zijn opnieuw niet significant verschillend: Hfl. 3870 (90%:3845-3893).

In concept III-B wordt het geplande G.A.O. geheel achterwege gelaten. Opmerkelijk is de toename van de MTBF tot 8655 uur (90%:8599-8711). Dit is ten opzichte van het S.A.O. een verbetering met ca. 18 %, maar ook de berekende totaalkosten zijn nu iets hoger: Hfl. 3945 (90%:3919-3968), een direkt gevolg van de O.A.K. voor de correctieve actie.

Concept III-C kent circa 12 % meer gelegenheden voor opportunistisch onderhoud dan concept III-B, resulterend in het hoogste onderdelenverbruik tot nu toe. Toch leidt concept III-C niet tot een beter systeemgedrag: de MTBF neemt iets af tot 8430 uur (90%:8373-8491). De totaal frequentie voor het onderhoud aan de pomp is hoger, een MTTM van 7660 uur (90%:7618-7700). Het verschil in totale kosten tussen de concepten III-B en III-C is niet significant.

De veronderstelling van een gefixeerde t_0 voor elke component in iedere stop, is in principe onjuist. Als de lengte van de stop moet worden vergroot door de opportunistische actie, dan zullen de extra kosten verrekend moeten worden in de kostenratio, met als gevolg dat de feitelijk optimale t_0 van stop tot stop zal variëren.

In dit voorbeeld verandert daarmee de t_0 voor de componenten 3,6 en 8, voor zover deze worden vervangen tijdens een stop veroorzaakt door component 4. In die situatie is een lagere kostenratio het gevolg en daarmee een iets langere t_0 . Door de eventuele vervanging van meer dan twee componenten in een stop wordt één en ander nog gecompliceerder. Conform de praktijk, kan dit ook in de simulatie voorkomen, maar in de kwantificering van het G.A.O. wordt er hier geen rekening meer mee gehouden.

Uit de simulatie met aangepaste waarden voor t_0 blijkt, dat het uiteindelijke effect op het systeemgedrag gering is; de simulatieresultaten zijn niet weergegeven. Het belangrijkste gevolg is een verschuiving van het opportunistische onderhoud naar de correctieve stops. In eerste instantie lijkt dit misschien opmerkelijk, maar het is een gevolg van de wijze waarop in dit voorbeeld de stopduur wordt bepaald: voor een correctieve stop wordt een langere stopduur gesimuleerd.

Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van het systeemgedrag voor de kwantificering van het concept is in de volgende simulatie, met concept III-B als uitgangspunt, t_0 gevarieerd. In concept IV-A zijn alle waarden van t_0 verminderd met 20 %, in concept IV-B zijn zij met 20 % verlengd. De resultaten zijn weergegeven in tabel 5.7.

Concept nummer	Benaming	Aantal opport. per jaar.	Aantal vervang. per jaar.	MTBF [uur]	MTBM [uur]	MTBPM [uur]	Kosten gem./run [Hfl.]
III-B	Corr. opp.	1.00	1.81	8655	8655	-	3945
IV-A	III-B-20%	0.99	1.97	8800	8800	-	4030
IV-B	III-B+20%	1.02	1.69	8540	8540	-	3870

Tabel 5.7: Rekenresultaten, concept IV-A en IV-B.

De voor concept IV-A verwachte toename in onderdeelverbruik, resulteert in een verbetering van de MTBF tot 8800 uur (90%:8741-8856), maar ook in hogere onderhoudskosten: Hfl. 4030 (90%:4007-4057). Concept IV-B geeft een vermindering van het onderdelenverbruik én een verlaging van de onderhoudskosten tot Hfl. 3870 (90%:3847-3895). Echter ook de MTBF neemt af tot 8540 (90%:8485-8596). Dit is nog altijd circa 20 % hoger dan voor het zuivere S.A.O is gesimuleerd, terwijl de totaal-kosten maar nauwelijks verschillen. Een nog iets langer gekozen t_0 zou misschien een nog betere keuze zijn.

Natuurlijk is dit slechts een willekeurig voorbeeld, maar ten aanzien van de mogelijkheden van het G.A.O kan de volgende tussenbalans worden opgemaakt:

- In de keuze van de onderhoudspolitiek kan niet voorbij worden gegaan aan de verwachte systeemlevensduur.
- Een stationair systeemgedrag wordt in veel gevallen niet bereikt, gezien de (ook in de praktijk) beperkte systeemlevensduur.
- Door de combinatie van òn de relatief lage vormfactor òn de beperkte systeemlevensduur zijn de mogelijkheden van gepland G.A.O. beperkt.
- Opportunistisch G.A.O is een belangrijke factor in de berekening van het systeemgedrag.
- Het ontkennen van structurele en vooral economische afhankelijkheden in een model resulteert in een onbetrouwbaar rekenresultaat. De berekende MTBF wordt dan in het algemeen te laag becijferd, de onderhoudskosten zullen dikwijls te hoog uitvallen.

Paragraaf 5.4.5. Toestandafhankelijk onderhoud.

De volgende stap is het simuleren van (een vorm van) T.A.O. Bij iedere reparatie worden de dan bereikbare onderdelen geïnspecteerd op sporen van slijtage (b.v. visueel); dit geeft de praktijk weer. Wanneer de inspectie uitwijst dat falen op korte termijn verwacht moet worden, wordt de component onmiddellijk (opportunistisch) vervangen. Welke onderdelen kunnen worden geïnspecteerd in de verschillende stops, wordt bepaald door de materiële structuur van het systeem, zie tabel 5.4.

Voor elk van de te inspecteren componenten is in concept V-A een detectietijd verondersteld van 10 % van de gemiddelde standtijd. Concept V-B geeft het resultaat wanneer de inspectietechniek zodanig wordt verbeterd, dat de detectieperiode tot 20 % kan worden vergroot. Gezien de aard van de inspectie zijn geen extra kosten verbonden gedacht aan de uitvoering ervan.

Concept nummer	Benaming	Aantal opport. per jaar.	Aantal vervang. per jaar.	MTBF [uur]	MTBM [uur]	MTBPM [uur]	Kosten gem./run Hfl.]
I	S.A.O.	-	1.18	7340	7340	-	3840
V-A	T.A.O 10%	1.06	1.20	8160	8160	-	3530
V-B	T.A.O 20%	1.06	1.23	8150	8150	-	3510

Tabel 5.8: Resultaten, onderhoudsconcept V-A en V-B.

Deze simulaties zijn een illustratie van de effectiviteit en in dit geval ook de efficiëntie van T.A.O. Er wordt een MTBF van 8160 uur (90%:8110-8209) gesimuleerd, een verbetering ten opzichte van uitsluitend S.A.O. met circa 11 %; dit terwijl het onderdeelverbruik toeneemt met slechts 2 %. Dit concept resulteert in het tot dusver laagste kostenniveau van Hfl 3530 (90%:3509-3556).

Een verbetering van de inspectiemogelijkheden, resulterend in concept V-B geeft geen significante verandering in het systeemgedrag te zien en ook de kosten verschillen niet. Investeren in een betere CB-methode heeft hier dus geen zin.

De onderhoudsconcepten III-A en V-A resulteren in een vergelijkbaar systeemgedrag (in MTBF). Beide zijn even effectief, maar wel ten koste van een groot verschil (ca.35 %) in onderdelenverbruik. Dit is een goede illustratie van de verdienste van T.A.O. Dat

de berekende onderhoudskosten toch niet meer dan circa 9 % uiteenliggen, komt door het feit dat de simulatie uitwijst, dat niet meer dan ongeveer 25 % van de totaalkosten bestaat uit materiaalkosten.

In elke praktische situatie bestaat een onderhoudsconcept uit een samenstelling van S.A.O., G.A.O. en T.A.O. Zelfs op componentniveau kunnen verschillende politieken naast elkaar worden toegepast. Een sterke interactie is het gevolg. Als bijvoorbeeld gepland G.A.O. wordt geformuleerd naast een opportunistische politiek, dan zal in het algemeen het eerste weinig effect sorteren, zoals werd geïllustreerd door de simulatie van de concepten III-A en III-C. Door het combineren van concept III-B met het concept V-A en V-B kunnen de concepten VI-A en VI-B gerealiseerd worden. Hierin wordt volledig gebruik gemaakt van de opportunistische mogelijkheden. De kwantificering per component voor beide concepten is ongewijzigd overgenomen. De resultaten staan in tabel 5.9.

Concept nummer		Aantal opport. per jaar.	Aantal vervang. per jaar.	MTBF [uur]	MTBM [uur]	MTBPM [uur]	Kosten gem./run [Hfl.]
Benaming							
III-B	Corr. opp.	1.00	1.81	8655	8655	-	3945
V-A	T.A.O 10%	1.06	1.20	8160	8160	-	3530
VI-A	III-B,V-A	0.98	1.81	8860	8860	-	3880
VI-B	III-B,V-B	0.94	1.82	8910	8910	-	3860

Tabel 5.9: Resultaten, onderhoudsconcept VI-A en VI-B.

Vergeleken met concept III-B wordt een verbetering van de MTBF gesimuleerd, voor VI-A 8860 uur (90%:8800-8915) en voor VI-B 8910 uur (90%:8849-8965). Beide concepten leiden tot relatief hoge onderhoudskosten van Hfl. 3880 (90%:3857-3906), respectievelijk Hfl. 3860 (90%:3837-3886). Hiervoor verantwoordelijk is het sterk toegenomen onderdelenverbruik; vergeleken met V-A is dit nu circa 50 % hoger. Concept VI-B resulteert noch in een significant ander systeemgedrag, noch in een aantoonbaar verschillend kostenpatroon. De extra investering in een verbeterd T.A.O. is blijkbaar niet zinvol. De eenvoudige verklaring hiervoor blijkt ook uit de simulatie: het G.A.O. is verantwoordelijk voor veruit het grootste deel (90%) van het opportunistische onderhoud. Dit resultaat geeft aan dat een verlenging van het toegepaste opportunistische interval mogelijk is. Bovendien kan door de gepresenteerde informatie van het gedrag per component bepaald worden, voor welke componenten dat het meest effectief is.

Het zoeken naar het optimale onderhoudsconcept was in dit voorbeeld echter niet de doelstelling. Zelfs in dit eenvoudige voorbeeld is duidelijk dat het aantal varianten bijzonder groot is.

Concluderend:

- Het a priori veronderstellen van de evenwichtssituatie in systeemgedrag is geen reëel uitgangspunt.
- In een juiste berekening van het systeemgedrag zijn G.A.O en vooral T.A.O. belangrijke factoren.
- De regels voor de (optimale) kwantificering van G.A.O. voor een enkelvoudig systeem kunnen, om verschillende redenen, niet optimaal zijn voor de componenten in een samengesteld systeem.
- De kwantificering van het 'optimale' onderhoudsconcept is een bijzonder moeilijke, zomet onmogelijke opgave, zelfs in een eenvoudige situatie. Het aantal parameters wordt al snel (te) groot.
- De nauwkeurigheid van de methode is in de meeste gevallen ruim voldoende om praktisch relevante verschillen te kunnen aantonen.

De verschillende varianten van het onderhoudsconcept kunnen voor diverse, uiteenlopende doelstellingen worden onderzocht. De simulatieresultaten kunnen direct worden gebruikt bij het ontwerp en de exploitatie van samengestelde objecten, maar zij zijn ook te gebruiken in een analyse van de problematiek van het beheer van reserve-onderdelen, een onderwerp dat in dit proefschrift verder niet behandeld zal worden.

6. SIMULATIE, BENODIGDE INFORMATIE

De modellering van het gedrag van repareerbare systemen met daarin onderhoud als expliciete factor stelt hoge eisen aan de gedetailleerdheid van het rekenmodel. Niet minder belangrijk zijn de eisen welke gesteld moeten worden aan de kwaliteit van de benodigde gegevens. In dit hoofdstuk zal in de paragrafen 6.1 en 6.2 ingegaan worden op de extern, respectievelijk intern beschikbare informatiebronnen voor de kwantificering van het faal- en herstelgedrag, alsmede op de bruikbaarheid ervan voor de structurering van onderhoud aan technische systemen. Voor het analyseren van in eigen beheer verzamelde gegevens wordt een leidraad gegeven in paragraaf 6.3, maar voor details wordt verwezen naar de grote hoeveelheid literatuur op dit gebied.

Paragraaf 6.1: Externe informatiebronnen.

Het gemis aan gegevens is naar alle waarschijnlijkheid het grootste probleem bij het analyseren van systeemgedrag. Dit geldt voor bedrijfszekerheidsvraagstukken in het algemeen, maar in nog sterkere mate voor een juiste modellering van (het effect van) onderhoud.

In veel gevallen kan globale informatie relatief eenvoudig worden verkregen. Gegevens van component- en/of (sub-)systeemgedrag kunnen worden gevonden in speciaal daarvoor opgerichte data-banken, in enkele boeken en in incidenteel gepubliceerde artikelen in vakliteratuur. In een groot deel van deze informatiebronnen blijven de gegevens beperkt tot het faalgedrag (en soms het herstelgedrag) van elektrische of elektronische componenten. Voor informatie over het gedrag van componenten of systemen van een meer werktuigkundige aard zijn de meest vermelde bronnen het boek van Green en Bourne [1977], het WASH Reactor Safety Study rapport [1974], in het bijzonder de appendices III en IV, alsmede de alleen voor leden toegankelijke SYREL databank te Engeland. Opvallend is de verschijningsdatum van deze, nog altijd veel geraadpleegde bronnen, waarbij bovendien nog moet worden opgemerkt dat de informatie waarop het gepresenteerde oorspronkelijk werd gebaseerd, nog verder uit het verleden afkomstig is.

Databanken zijn in een aantal gevallen slechts toegankelijk voor de aangesloten leden. De oorzaak is de soms vertrouwelijke aard van de informatie, maar zeker ook de commerciële waarde. In een aantal gevallen is door ondernemers van een bepaalde industriële activiteit een bestand voor eigen gebruik opgebouwd, bijvoorbeeld het OREDA project (Offshore RELiability DATA), waarin vrijwel alle in de offshore actieve bedrijven participeren. Veel databanken zijn gespecialiseerd, bijvoorbeeld in elektrische/elektronische of mechanische componenten en/of systemen.

De uitgave van het Directoraat Generaal van de Arbeid: 'Methoden voor het bepalen en verwerken van kansen' [1982] geeft een opsomming van en een korte toelichting op een aantal data-banken en andere informatiebronnen. In een recent verschenen T.N.O rapport [1988] is een schematische indeling opgenomen, waarmee een geschikte bron kan worden geselecteerd.

De gegevens hebben slechts beperkte waarde door hun onvolledigheid. Informatie wordt verstrekt zonder bronvermelding en ook de gebruiksomstandigheden worden soms achterwege gelaten. Verder wordt als regel verondersteld dat het 'normale' onderhoud op het systeem wordt uitgevoerd, zonder dat normale onderhoud nader te specificeren. Bovendien wordt in bijna alle gevallen de informatie over het faalgedrag verstrekt in de vorm van een (constante) faalfrequentie of van een faalkans per vraag, in een aantal gevallen voorzien van een betrouwbaarheids-interval, meestal in de vorm van een 'error factor'. Niet alle bronnen voorzien in een schatting voor de herstelduur. Wel wordt, als het herstelgedrag in de vorm van een verdeling is opgenomen, meestal de lognormale verdeling gebruikt.

Voor de modellering van onderhoud zijn de beschikbare gegevens over het gedrag van componenten van werktuigkundige aard in vrijwel alle gevallen onvoldoende gedetailleerd. De geboden informatie blijkt niet toereikend te zijn om het effect van onderhoud te modelleren en/of een onderhoudspolitiek te kwantificeren. Uit dit alles moet worden geconcludeerd dat voor het beheersen van een onderhoudsproces veruit de meeste gegevens in de eigen situatie moeten worden verzameld en geanalyseerd.

Paragraaf 6.2: Interne informatiebronnen.

De meeste systemen in de praktijk zijn dermate complex dat het slechts in uitzonderlijke gevallen economisch haalbaar is, de feiten over alle gebeurtenissen betreffende het systeemgedrag routinematig te verzamelen, zodat voor een eventuele latere analyse de vereiste informatie voorhanden is. Het belang van een dergelijke analyse wordt meestal pas actueel als een verhoogd veiligheidsrisico, een toenemend productieverlies of een

verhoogde onderhoudsinspanning ongewenste (financiële) consequenties hebben. Zelfs dan is de beschikbare hoeveelheid tijd en mankracht voor het verzamelen van informatie zeer beperkt, waardoor ten tijde van de noodzaak tot analyse weinig concrete gegevens voorhanden zullen zijn. De opbrengst van data-collectiesystemen is moeilijk in te schatten, terwijl de kosten in veel gevallen duidelijk zijn, zie Austin [1986].

De hoeveelheid literatuur handelend over statistische gegevensverwerking is zeer omvangrijk. Veel minder blijkt geschreven te zijn over over de vraag welke gegevens verzameld moeten worden en over de manier waarop dat moet gebeuren. Het Eurodata Project Report (no 3), 'Guide to Reliability Data Collection and Management' door Stevens [1986] is een van de schaarse voorbeelden. Een meer op de praktijk toegesneden publicatie in de Nederlandse taal over dit onderwerp is in voorbereiding door een werkgroep van de Nederlandse Vereniging voor Bedrijfszekerheidstechnologie (NVvB)¹.

In een praktijksituatie zijn, naast de hiervoor geschetste mogelijkheden, een viertal informatiebronnen te onderscheiden:

- Expertmeningen.
- Laboratoriumgegevens.
- Eigen bronnen van algemene aard.
- Eigen bronnen van specifieke aard.

Het analyseren van de informatie voor bedrijfszekerheidsdoeleinden moet voor elke categorie op verschillende wijze geschieden.

Expertmeningen.

Expert in systeemgedrag is het personeel uit productie- en onderhoudsdiensten. Hier ligt een uiterst waardevolle bron voor, in eerste instantie, kwalitatieve informatie. Voor het kwantitief maken van hun meningen worden in de literatuur twee klassieke methoden genoemd: de Delphi Methode, beschreven door onder andere Linstone en Turoff [1975], en de techniek van het paarsgewijs vergelijken, beschreven door Hunns en Daniels [1981]. Beide technieken zijn gestructureerde methoden om de verschillen in mening van

¹ Werkgroep DATA, vermoedelijke publicatiedatum einde 1989.

experts te overbruggen en tot een eindoordeel te komen. Een onderzoek naar bruikbaarheid in de praktijk is en wordt verricht door Van Steen en Cooke¹. Naast de hiervoor genoemde methoden hebben zij op beperkter schaal een derde methode gehanteerd, gebaseerd op de Bayesiaanse aanpak. Een eenduidige voorkeur voor één van de onderzochte methoden is niet opgenomen in de (voorlopige) conclusies. Elk van de methoden biedt specifieke voordelen, zodat naar alle waarschijnlijkheid een combinatie ervan de beste resultaten oplevert.

Laboratoriumgegevens.

In een beperkt aantal gevallen kunnen componenten of complete systemen worden getest in laboratoria. De testomstandigheden kunnen daarbij dusdanig afwijkend zijn van de realiteit, dat het gevonden cijfermateriaal, bijvoorbeeld de bedrijfszekerheidsparameters, moet worden gecorrigeerd (a.g.v. schaalwijzigingen, versnelde testen, etc). Dit kan de waarde van de gegevens discutabel maken. Ook de uitkomsten van de eerder vermelde Stress-Strength analysemethode, zie paragraaf 2.3, kunnen onder deze categorie worden gerangschikt. Soms omvat de testfase alleen de eerste periode van de systeemlevensduur, een periode waarin feitelijk nog geen stabilisatie in het gedragsevenwicht verondersteld mag worden (zie hoofdstuk 8). Hoe de gevonden informatie in dat geval moet worden geïnterpreteerd is niet altijd duidelijk; onder andere Blumenthal, Greenwood en Herbach [1984] rapporteren over dit probleem.

Eigen bronnen van algemene aard.

In vrijwel alle industriële activiteiten worden op verschillende niveaus gegevens over het systeemgedrag verzameld en opgeslagen. Soms gebeurt dit direct, bijvoorbeeld als deeltaak van de procesbesturings-computer, soms indirect, bijvoorbeeld bij een magazijn-administratie van het onderdelenverbruik. Dergelijke gegevens kunnen vele doeleinden dienen; de informatie voor een bedrijfszekerheidsanalyse is één van de mogelijke doorsnijdingen. Omdat de lokale situaties sterk kunnen verschillen, zullen voor het distilleren van informatie dikwijls ad hoc methoden moeten worden toegepast, zie bijvoorbeeld English [1988]. De kosten voor het verkrijgen van de informatie zijn echter relatief laag.

¹ R.M. Cooke, T.U.-Delft, J.F.J. van Steen, T.N.O.- Apeldoorn, vermoedelijke publicatiedatum begin 1989.

Intern specifieke bronnen.

Deze bronnen, de eigen veldgegevens, bestaan uit de directe productie- en onderhoudsgegevens van een operationeel systeem. Deze informatie is de meest gebruikelijke bron voor bedrijfszekerheidsgegevens, zowel voor de centrale commerciële databanken als voor de eigen informatiebehoefte. De juistheid en volledigheid, ofwel de kwaliteit van de informatie zal van geval tot geval zeer uiteenlopen, zodat controle meestal noodzakelijk zal zijn. Hierbij is de inbreng van het verantwoordelijke personeel onontbeerlijk. Soms is controle en/of aanvulling mogelijk door de informatie van verschillende registraties als het onderhoudslogboek, operationele gegevens en reservedelenverbruik te combineren. Het kan dan blijken dat in veel gevallen de verschillende bronnen niet volledig en/of betrouwbaar zijn. Zo kan in de onderhoudsregistratie niet meer terug te vinden zijn, wanneer een modificatie aan het systeem of in de procesvoering werd ingevoerd. Een dergelijke wijziging kan de systeembelasting en daarmee de belasting op de componenten zodanig beïnvloeden, dat de tot dan toe verzamelde informatie (deels) niet meer bruikbaar is. Niet zelden ook zal een onvolledig ingevulde rapportage geconstateerd worden. Dit kan een direct gevolg zijn van een voor deze taak slechte motivatie van het uitvoerende en verantwoordelijke personeel, hetgeen in de hand wordt gewerkt indien de met deze gegevens bereikte resultaten (onbewust en ongewild) buiten hun gezichtsveld worden gehouden.

Voor iedere categorie van informatiebronnen geldt dat alleen een juiste discipline kan leiden tot goede resultaten, zodat op deze plaats slechts een subjectieve schatting over de kwaliteit van de gevonden informatie mogelijk is, zie tabel 6.1.

Informatie bron.	item omschrijving.	belasting omstandigheden.	aantal en aard der storingen.	bedrijfsduur tot falen.	herstel-duur.	kosten van de informatie.
Externe bronnen.	**	*	**	*	*	***
Expertmening.	***	***	**	**	**	**
Laboratorium tests.	*****	**	*****	*****	*****	*
Intern algemene bronnen.	****	****	****	****	****	****
Intern specifieke bronnen.	*****	*****	*****	*****	*****	***

Tabel 6.1: Subjectieve waardering van de informatiebronnen; vijf sterren is de meest wenselijke kwaliteit (gebaseerd op: Euredata, project report no.3).

Paragraaf 6.3: Analyse van de eigen gegevens.

In de praktijk kunnen verschillende informatiebronnen beschikbaar zijn, zodat combinatie of controle van informatie in principe mogelijk is. Niet zelden is een dergelijke combinatie zelfs noodzaak, omdat de beschikbare informatie per categorie dermate gering blijkt, dat het opmaken van een conclusie met het materiaal uit iedere categorie apart onmogelijk zou zijn.

Het probleem hierbij is dat de gegevens niet homogeen qua structuur zijn. Informatie over systeemgedrag kan bijvoorbeeld bestaan uit testresultaten, historische gegevens en expertmeningen. Een directe combinatie volgens de klassieke methoden is onmogelijk; dit is het terrein van de Bayesiaanse statistiek.

Om een eerste indruk te krijgen van de achtergronden van deze methode is het artikel van Lindley en Phillips [1976] zeer aanbevelenswaardig. In eenvoudige bewoordingen illustreren zij de aanpak met een tweetal voorbeelden. In het artikel wordt inzicht verschaft in de verschillen tussen de klassieke en de Bayesiaanse benadering. Martz en Waller [1982] gaan specifiek in op het gebruik van de methode in de bedrijfszekerheidstechniek.

Eén van de belangrijkste obstakels voor het routinematig toepassen van de Bayesiaanse methoden blijkt het gemis aan efficiënte algoritmen voor het verrichten van de (omvangrijke) rekenkundige bewerkingen, impliciet verbonden aan het gebruik. Op dit moment is althans commercieel nog geen computerpakket beschikbaar, maar belangrijk werk voor de praktische implementatie is al verricht door Naylor, Smith en anderen [1982,1987]. Een publicatie in boekvorm over de Bayesiaanse methode en het gebruik ervan in de bedrijfszekerheid is in voorbereiding¹.

Voor het schatten van de drie parameters van de Weibullverdeling volgens deze methode is nog weinig materiaal voorhanden. Naylor en Smith [1987] vergelijken de uitkomsten van de veel toegepaste klassieke Maximum Likelihood methode met de resultaten van de Bayesiaanse aanpak. De auteurs gaan in op de verschillen in uitkomst en komen tot de conclusie, dat van de Bayesiaanse benadering iets betere resultaten verwacht mogen worden.

¹ Titel: Bayesian methods in Reliability, editors R.A.J. Badoux en P.C. Sander, uitgever: Kluwer 1989.

Materiaal van de gelijknamige cursus.

In praktische toepassingen wordt tot op heden nog slechts op bescheiden schaal van de Bayesiaanse Methode gebruik gemaakt, maar door de recente ontwikkelingen neemt het potentiëel voor gebruik in de praktijk toe. De behoefte aan een uniforme en consistente methode voor het combineren van gegevens van verschillende oorsprong kan niet ontkend worden. Door onder andere de toenemende complexiteit van de technische systemen, de strengere milieu- en veiligheidseisen (ook vanuit overheidswege) en de meer dan evenredig gegroeide (economische) belangen gemoeid met het veilig en storingsvrij functioneren van technische systemen, stijgt de behoefte zelfs sterk. Ook voor de keuze in kwalitatieve en vooral kwantitatieve zin van de onderhoudspolitiek, lijkt de Bayesiaanse statistiek een noodzakelijk gereedschap. Op het voor onderhoud relevante niveau zijn dikwijls hooguit enkele concrete faalgegevens voorhanden, maar juist op dit niveau kan redelijkerwijs gevraagd worden naar de meningen van experts. Ondanks de introductie van de Bayesiaanse statistiek in de praktijk van de bedrijfszekerheid nu enige decennia geleden, is de analyse van de gegevens in vrijwel alle gevallen beperkt gebleven tot de klassieke statistische methoden. Deze zijn beschreven door onder andere

Ook in de klassieke statistische analyses van (historische) gegevens is nog altijd ontwikkeling gaande. Het blijkt een zeer breed onderzoeksterrein en dat resulteert in een veelheid aan publicaties. Het is ondoenlijk het totale terrein te evalueren. De nieuw geïntroduceerde gemodificeerde methoden en/of verdelingstypen hebben dikwijls een nauwkeuriger uitkomst in de analyseresultaten tot doel. Voor de besturing van een onderhoudsproces is een dergelijke verfijning niet altijd noodzakelijk. Bovendien ontbreken in de meeste gevallen de noodzakelijke gegevens, waardoor een hogere nauwkeurigheid niet kan worden gerechtvaardigd, zie ook paragraaf 2.3.2.

In de industriële praktijk en met name in het onderhoud, zijn velen nog onvoldoende bekend met de klassieke, eenvoudige methoden. Hierdoor worden in de analyse van gegevens soms zodanige fouten gemaakt, dat het risico van een verkeerde conclusie reëel genoemd mag worden.

Voor een groot deel wordt deze onbekendheid in stand gehouden door de (onnodig) grote verscheidenheid in beschikbare statistische methoden. Bovendien geschiedt de presentatie, terwille van wiskundige volledigheid, soms dusdanig gecompliceerd, dat een ontoegankelijk gebied ontstaat voor gebruik in de onderhoudspraktijk. Dit heeft geresulteerd in de zeer grote kloof tussen theorie en praktijk. In een reactie op de uitspraak van Evans [1971]: *'Data we will never get'*, geven Ascher en Feingold [1984] het aanvullende commentaar: *'We (the reliability profession) would not know what to do with the data, if we ever got it'*.

Voor de analyse van de faal- en herstelgegevens ten behoeve van het onderhoudsmodel wordt gepleit voor het hanteren van eenvoudige methoden, waarvan de eigenschappen goed bekend zijn en die hun nut in de praktijk hebben bewezen. In de keus van de analysetechniek kan in veel gevallen worden volstaan met al dan niet computerondersteunde, grafische methoden. Deze zijn eenvoudig te hanteren en presenteren de resultaten op een overzichtelijke manier. Bovendien kunnen uitschieters in de waarnemingen dikwijls snel worden onderkend; een goed 'contact' met de gegevens blijft behouden.

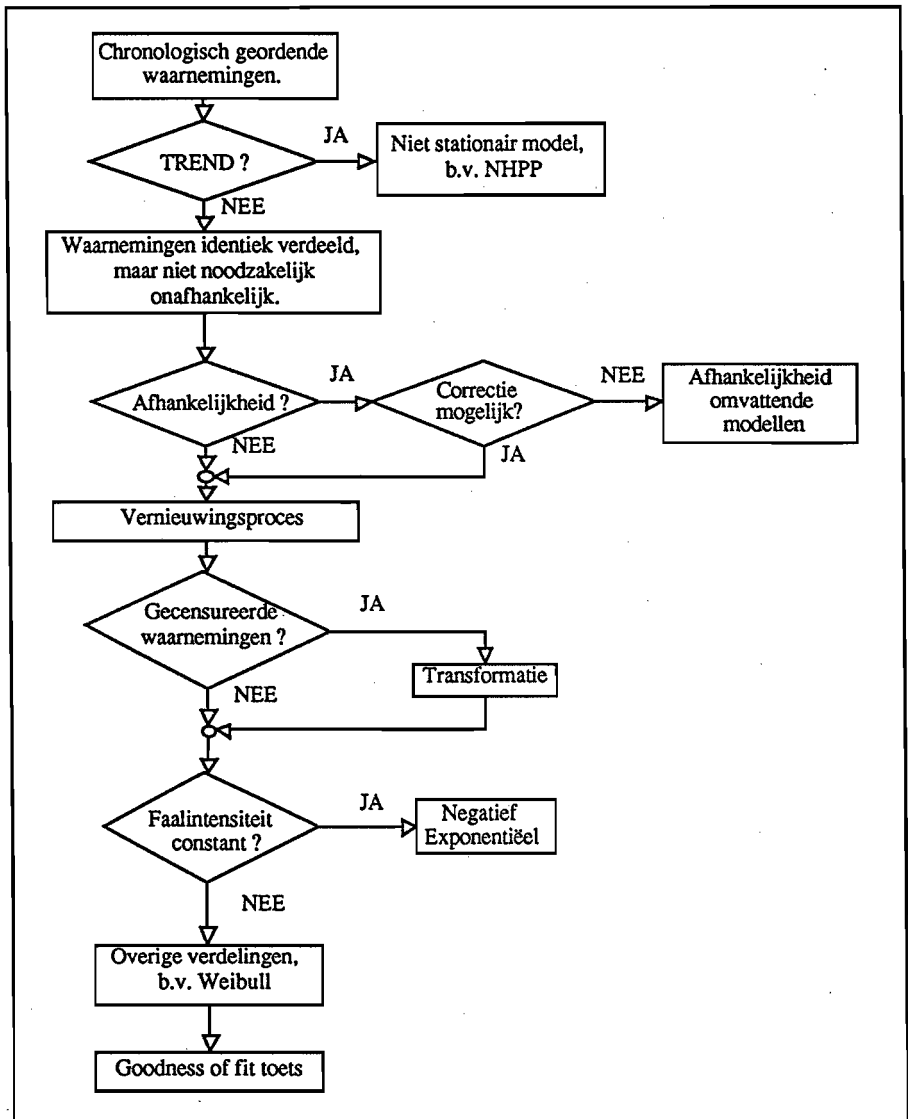
Over een gedegen analyse van (faal)gegevens van repareerbare systemen is literatuur voorhanden. Toch is een volledig analyseschema geen gemeengoed, zoals blijkt uit een oriënterend onderzoek op beperkte schaal onder een relevant deel van de Nederlandse industrie. Er is onder andere gericht gevraagd naar de bekendheid met de analysemethoden en het gebruik van software voor gegevensverwerking, zie Eurlings [1989].

In veel literatuur wordt er a priori van uitgegaan dat de gegevens onderling onafhankelijk en identiek verdeeld zijn. Maar voordat de daarvoor aangereikte methoden in de praktijk toegepast mogen worden, moeten deze veronderstellingen op zijn minst eerst aannemelijk worden gemaakt. Uiteraard kan bij een statistisch probleem als dit, een mathematisch gesloten bewijs nooit geleverd worden. Er moet worden bedacht dat een praktische oplossing gezocht wordt en dat het alternatief meestal bestaat uit geen oplossing.

Ascher en Feingold [1984] besteden veel aandacht aan het probleemgebied rond de analyse van de faalgegevens, afkomstig van repareerbare systemen. Zij presenteren een flowdiagram voor de verwerkingsprocedure, zie figuur 6.1.

Een eerste, essentiële stap in de analyse is de controle op een trend in de gegevens. Wanneer een trend gesignaleerd wordt, dan is het proces daarmee niet als stationair te karakteriseren en zijn de gegevens niet als onderling onafhankelijk en identiek verdeeld te beschouwen; de oorspronkelijke, chronologische volgorde bevat dan belangrijke informatie over het tijdsafhankelijke gedrag. In het bijzonder is modellering als vernieuwingsproces onder deze omstandigheden niet verantwoord.

Voor de volledigheid moet opgemerkt worden dat het ontbreken van een trend (formeel) niet als formeel bewijs geldt, dat een stationaire toestand inderdaad bereikt is. Op een lager (substelsysteem of component) niveau dan waarvan de geanalyseerde gegevens afkomstig zijn, kunnen nog altijd instationaire processen optreden, zoals Cox en Lewis [1966] vaststellen. Misschien moet ter verduidelijking worden opgemerkt dan ook het SRP een niet stabiele gedragsfase kent, zie ook hoofdstuk 8. Voor ons doel mag de opmerking van Cox en Lewis als theoretische mogelijkheid worden afgedaan.



Figuur 6.1: Statistische analyse van opeenvolgende storingsintervallen van reparerbare systemen (naar: Ascher en Feingold 1984).

De voor de onderhoudspraktijk geanalyseerde gegevens betreffen normalerwijze een zeer gedetailleerd niveau, zodat voor praktisch gebruik bij afwezigheid van een trend de conclusies van een stationaire toestand gerechtvaardigd zijn. Er mag bij afwezigheid van een trend (praktisch gezien) verondersteld worden dat de waarnemingen identiek ver-

deeld zijn, maar zelfs in deze situatie is onderlinge onafhankelijkheid nog niet vanzelfsprekend.

Voor het toetsen van gegevens op de aanwezigheid van een trend zijn een aantal klassieke methoden beschikbaar. Een breed scala aan methoden voor het toetsen van een nulhypothese tegenover verschillende alternatieven is beschikbaar, bijvoorbeeld de Laplace toets [1773, zie Cox en Lewis [1966] e.a.), Spearmans Rank toets, etc. Door onder andere Cox en Lewis [1966] en Bain, Engelhard en Wright [1984] is onderzoek gedaan naar de merites van de verschillende toetsen. Voor de uiteenlopende combinaties van de hypothesen zijn verschillende toetsen als optimaal te klasseren. Daarom kan het zinvol zijn diverse toetsen naast elkaar op de verzamelde gegevens uit te voeren. De gecombineerde resultaten geven een zo goed mogelijk beeld van een eventuele trend in de gegevens.

Voor het veelvoorkomende geval dat in de analyse geen goede argumenten te vinden zijn voor de keus tussen de alternatieven beveelt Ascher [1984] de Mann's toets [1945] aan. Deze is geschikt als toets voor het onderscheid tussen het vernieuwingproces als nulhypothese en een proces met monotone trend als alternatief. Het in veel toetsen als nulhypothese veronderstelde HPP is immers een minder generalistisch uitgangspunt dan strikt gewenst.

Dikwijls zijn echter eenvoudige, grafische technieken (op lineair papier) toereikend. Ascher [1978,1984] geeft een toelichting op een aantal van de mogelijkheden en voorziet in relevante literatuurverwijzingen. Praktische voorbeelden kunnen tevens worden gevonden in Cox en Lewis [1966] en MIL-HDBK-189 [1981].

Tegen het opmaken van voortijdige conclusies wordt gewaarschuwd door Jewell [1978]. In zijn resultaten wordt aangetoond dat de praktische mogelijkheden tot het correct aantonen van (de afwezigheid van) een trend op zijn minst twijfelachtig te noemen is indien de testduur minder is dan 5-10 maal de geconstateerde MTBF, of indien minder dan 10 tegelijk functionerende parallelsystemen geanalyseerd worden. Dit is het directe gevolg van het feit dat gedurende een beperkte testperiode er een grotere kans is dat juist de korte bedrijfsduren worden gesignaleerd.

De bedrijfszekerheidstechniek kent een aantal mogelijkheden tot het modelleren van trendverloop. Dikwijls worden NHPP's toegepast, deze zijn echter niet opgenomen in het onderhoudsmodel. Overigens zijn voor de karakterisering van een aantal NHPP's grafische methoden beschikbaar, zie bijvoorbeeld Duane [1964], Barlow en Davis

[1977,1979] en Lilius [1979]. De praktische toepassing ervan is echter tot op heden beperkt gebleven.

In het onderhoudsmodel wordt op componentniveau een vernieuwingspatroon verondersteld. De constatering van een trend in de gegevens betekent dat hieraan niet wordt voldaan, het kan betekenen dat de informatie niet op een voldoende gedetailleerd niveau is geanalyseerd. Deze situatie zal maar weinig voorkomen als de componenten inderdaad de kleinste als eenheid te vervangen onderdelen modelleren. In deze fase heeft de grote detaillering van het opgestelde model duidelijke voordelen.

Naast de afwezigheid van een trend is voor het hanteren van het vernieuwingsmodel ook onderlinge onafhankelijkheid in de waarnemingen vereist. Soms kan bijvoorbeeld een zekere periodiciteit worden onderkend, misschien door seizoensinvloeden, of een paarsgewijze afhankelijkheid, waarbij telkens een korte standtijd volgt op een langere storingsvrije periode.

Het op (on)afhankelijkheid toetsen van een reeks waarnemingen stuit echter op praktische problemen. Voor gebruik van de bekende toetsprocedures is het noodzakelijke aantal gegevens relatief hoog, minimaal 50-100. Dat is voor de karakterisering van het faalgedrag een zeer groot aantal, zeker in relatie tot het aantal componenten in een onderhoudsmodel. Het onderwerp wordt gedetailleerd beschreven in Cox en Lewis [1966]. Ook voor het weergeven van afhankelijkheden bestaan bedrijfszekerheidsmodellen, maar de praktische toepassingen zijn beperkt in aantal.

Een controle op een eventuele periodiciteit in de gegevens is ook slechts mogelijk wanneer voldoende gegevens voorhanden zijn. In de literatuur wordt hiervoor dikwijls de methode van Box en Jenkins [1970] genoemd. In de bedrijfszekerheidspraktijk zijn opnieuw weinig of geen toepassingsvoorbeelden bekend.

De juiste controle op trend in de gegevens is in veel gevallen belangrijker dan een formele analyse van eventuele afhankelijkheid. Eventuele afhankelijkheid of periodiciteit kan dikwijls (ad hoc) geconstateerd en gecorrigeerd worden zodat een verdere verwerking als onafhankelijke waarnemingen mogelijk blijft, zie bijvoorbeeld English [1988].

Zoals in paragraaf 4.4.2 is omschreven kan in het onderhoudsmodel tot op zekere hoogte rekening worden gehouden met afhankelijkheden in het faalgedrag tussen de componenten. De modellering is echter niet volledig, waardoor de controle op een dergelijke afhankelijkheid een voorwaarde lijkt voor een juiste toepassing. In de praktijk zal het bestaan van eventuele afhankelijkheid het best kunnen worden achterhaald in overleg met het direkt betrokken (onderhouds-)personeel.

Wanneer aannemelijk is gemaakt dat de gegevens geen trend bevatten en onderling onafhankelijk zijn, kan worden overgegaan tot toepassing van de gebruikelijke analyse-technieken voor vernieuwingsprocessen. Opgemerkt moet worden dat een dergelijke bewijsvoering formeel niet verder reikt dan de uitspraak dat er gezien deze constatering, geen aanwijzingen zijn dat het vernieuwingsproces onjuist is, maar voor praktijkgebruik moet dat als voldoende gezien worden.

Voor de verdere analyse kan nu de chronologische volgorde van de gegevens worden losgelaten en kunnen de gegevens worden gerangschikt naar de gerealiseerde bedrijfsduur.

Een veel voorkomende complicatie is de aanwezigheid van incomplete, ofwel gecensureerde waarnemingen. Componenten worden niet zelden vroegtijdig vervangen door een andere oorzaak dan falen, bijvoorbeeld als gevolg van preventief onderhoud of door beschadiging na falen van een andere component. Voor de transformatie van gecensureerde waarnemingen op een zodanige wijze dat de impliciet aanwezige informatie zo goed als mogelijk benut wordt, is de Product-Limiet methode ofwel de Kaplan-Meier methode [1958] beschikbaar. Geurts [1986] gaat in een deel van zijn proefschrift op gedetailleerde wijze in op de analyse van gecensureerde waarnemingen, onder andere op een tweetal versies van de Kaplan-Meier methode, oorspronkelijk gefomuleerd door Efron [1967] en Gill [1980]. Diverse andere modificaties en uitbreidingen van de methode zijn bekend, maar worden in de bedrijfszekerheid weinig toegepast, zie onder andere Cox [1972]. Ook door Geurts [1986] wordt opgemerkt dat praktisch gezien de importantie van de verschillen in de uiteenlopende versies beperkt is, althans voor de structurering en kwantificering van het onderhoud.

Het analyseren van onderling onafhankelijke en identiek verdeelde, al dan niet gecensureerde waarnemingen is veelvuldig beschreven, zie bijvoorbeeld Shooman [1968], Nelson [1969,1982], Mann, Schafer en Singpurwalla [1974], Kalbfleisch en Prentice [1980], O'Conner [1981], Lawless [1982], Lewis [1984], etc. Na rangschikking en eventuele transformatie zal in veel gedragsstudies eerst gecontroleerd moeten worden of een als nulhypothese aan te nemen exponentiële verdeling moet worden verworpen; pas daarna kan worden overgegaan op andere verdelingstypen. Ook voor het aanpassen van een verdeling op de gegevens wordt gepleit voor het hanteren van grafische methoden. Er blijkt relatief veel onderzoek gedaan te zijn naar de condities waaronder de verschillende analysemethoden naar verwachting de beste resultaten opleveren; in veel van deze onderzoeken staat de Weibullverdeling centraal. Het resultaat is dat wanneer slechts een gering aantal gegevens bekend is, stel 5-15, de grafische methoden minstens een met de klassieke Maximum Likelihood methode vergelijkbaar resultaat opleveren. Voor een

groter aantal gegevens is een (eventueel gemodificeerde) Maximum Likelihood methode waarschijnlijk superieur, zie Gross en Lurie [1977] en Kuchi, Kaio en Osaki [1979]. De Maximum Likelihood methode is omschreven door onder andere Shooman [1968]. Voor een uitleg van de opbouw en het gebruik van de grafische methoden wordt verwezen naar onder andere Nelson [1969,1982] en Lewis [1984].

Gegevens kunnen worden geplot op statistisch grafiekpapier, waarmee een schatting voor de bijbehorende parameters kan worden afgelezen. In de meeste gevallen is de 'op het oog' best passende rechte lijn door de geplote punten voldoende aanwijzing voor de beste keus. Eventueel kan de best passende verdeling worden geselecteerd door toepassing van een zogenaamde 'goodness of fit' toets. Voor deze toepassing is de Kolmogorov-Smirnov toets veel genoemd. Het gebruik in de praktijk van deze en andere, gerelateerde toetsen is beschreven door onder andere Stephens en Agostino [1986]. De verschillende typen verdelingen hebben elk een eigen specifiek toepassingsgebied, zoals is toegelicht in paragraaf 2.3.2; deze informatie kan nuttig zijn bij een eerste keuze.

Paragraaf 6.4: Conclusie.

In de voorafgaande paragrafen is aangegeven dat voor de keuze en de kwantificering van de onderhoudspolitieken vrijwel in alle gevallen moet worden teruggegrepen op eigen gegevens, hoe summier ook aanwezig. De informatie welke uit externe bronnen verzameld kan worden, is slechts beperkt bruikbaar, behalve misschien in een analyse volgens de Bayesiaanse methode, waarmee informatie uit verschillende bronnen gecombineerd kan worden. De Bayesiaanse aanpak lijkt ook voor de kwantificering van expertmeningen op den duur een veelbelovende mogelijkheid. De inbreng van experts zal altijd een onmisbaar element in de informatievoorziening blijven.

Op korte termijn moet nog dikwijls worden volstaan met de meer klassieke statistische methoden. Benadrukt wordt dat, gezien de meestal beperkt beschikbare hoeveelheid informatie, de eenvoudige, zoveel mogelijk grafische analysemethoden goed voldoen. Voor enkele 'valkuilen' in de analyseprocedure is gewaarschuwd, maar in de praktijk blijken deze relatief eenvoudig te vermijden. De detaillering van het onderhoudsmodel blijkt hier een voordeel te zijn.

7 SIMULATIE, PRAKTIJKTOEPASSINGEN

De mogelijkheden van het simulatiemodel zullen worden geïllustreerd aan enkele systemen van uiteenlopende aard. Bij het oplossen van elk probleem zijn een aantal stadia te onderkennen, dat zijn:

- probleemstelling en afbakening,
- inventarisatie/evaluatie beschikbare gegevens,
- kwalitatieve modelbouw,
- kwantitatieve modelinvulling,
- keuze en kwantificering onderhoudsconcept,
- modelvalidering,
- toepassing.

De meeste hiervan zijn becommentarieerd in de voorgaande hoofdstukken, zodat een en ander hier slechts kort gememoreerd hoeft te worden. De afbakening van de probleemstelling is uiterst belangrijk voor de definiëring van de systeemgrenzen en voor de gewenste detaillering van het model. De maximaal haalbare detaillering wordt echter bepaald door de beschikbare gegevens. In de kwalitatieve modelbouw zijn de componentkeuze en de inventarisatie van de te modelleren onderlinge afhankelijkheden aktueel. De kwantitatieve invulling bestaat uit het concretiseren van het faal- en herstelgedrag op componentniveau en het beschikbaar stellen van de benodigde financiële informatie. Na voltooiing van deze stadia is, afgezien van het onderhoudsconcept, het systeemmodel compleet.

Het volgende stadium bestaat uit de keuze in kwalitatieve en kwantitatieve zin van het te simuleren onderhoudsconcept. Voor de validering van het ontwikkelde model zal in de meeste gevallen het op dat moment gehanteerde concept worden gemodelleerd, zodat de simulatieresultaten kunnen worden vergeleken met de realisatie. Eenmaal geaccepteerd kent het model, naast de analyse van de oorspronkelijk geformuleerde probleemstelling, dikwijls een veelheid aan toepassingsmogelijkheden.

In elk van de komende voorbeelden wordt een ander aspect van de onderhoudsmodellering uitgewerkt. In het eerste voorbeeld, de tandwielkast, ligt het accent op de evaluatie van de beschikbare gegevens.

Het tweede voorbeeld, een deel van een productiesysteem, illustreert de kwalitatieve en kwantitatieve opbouw van een model en met het derde voorbeeld, een dieselmotor voor tractiedoeleinden, wordt ingegaan op enkele van de toepassingsmogelijkheden. Telkens wordt, uit praktische overwegingen, slechts een beperkt aantal van de resultaten vermeld.

De simulatieresultaten worden in de meeste gevallen gepresenteerd als puntschattingen, gewoonlijk zonder vermelding van het erbij behorende betrouwbaarheidsinterval. De feitelijke grootte van dat interval wordt maar voor een deel bepaald door de rekenmethode. Een naar alle waarschijnlijkheid veel belangrijker oorzaak van onbetrouwbaarheid is gelegen in beperkte betrouwbaarheid van de schatting van het faalgedrag van de componenten, vooral wegens het doorgaans geringe aantal concrete waarnemingen. De bepaling van het betrouwbaarheidsinterval is mogelijk voor complete waarnemingen. Voor (grotendeels) gecensureerde gegevens is deze problematiek complexer, zie onder andere Hall [1988]. Wanneer expertmeningen en andere minder concrete informatiebronnen moeten worden gebruikt, is de bepaling van de bereikte nauwkeurigheid in de resultaten een nog niet opgelost probleem.

In deze keten van onduidelijkheden is de simulatie waarschijnlijk niet de zwakste schakel. De presentatie van een betrouwbaarheidsinterval als gevolg van de gehanteerde methode, pretendeert in veel gevallen een schijnzekerheid. Desondanks is het programma voorbereid voor de berekening en de weergave van het betrouwbaarheidsinterval (a.g.v. de methode) in het eindresultaat, vooral om de significantie van de verschillen tussen de simulatieresultaten onderling te bepalen. In de meeste gevallen is een vergelijk in de simulatieuitkomsten op componentniveau in de analyse van het veranderde systeemgedrag tenminste even belangrijk.

Gezien de vertrouwelijke aard van de verwerkte gegevens is de informatie in de voorbeelden, voor zover vermeld, gemaskeerd.

Paragraaf 7.1: Tandwielkast.

Probleemstelling en afbakening.

Het eerste voorbeeld uit de praktijk is eenvoudig en illustratief van aard. Het te modelleren systeem is een tandwielkast (TWK) met haakse overbrenging. Door een electromotor wordt via de TWK een roerder aan de onderzijde van een reactorvat aangedreven. Elektromotor, TWK en roerder vallen binnen de systeemgrenzen. Twintig van deze systemen zijn opgenomen in een productiesysteem, dat bestaat uit 4 straten van elk 5 parallelle lijnen.

Door het aantrekken van de markt voor het product is een zo hoog mogelijke beschikbaarheid gewenst. Ongepland S.A.O. onderhoud wordt als zeer storend en financieel nadelig ervaren. De vraagstelling luidt of G.A.O., geconcentreerd in de jaarlijkse stop een (economische) verbetering kan betekenen ten opzichte van het tot op het moment van de analyse gehanteerde onderhoudsconcept van ongepland onderhoud en zo ja, welk preventief interval dan moet worden gekozen. In de berekening moet daartoe met zowel de O.U.K. als de O.A.K. gerekend worden.

Inventarisatie van de beschikbare gegevens en modelbouw.

De procesgang is batchgewijs. In de (spoel-)periode tussen twee batches, is gelegenheid tot inspectie en eventueel klein onderhoud. Eén TWK wordt in reserve gehouden. De TWK wordt geïnspiceerd volgens onderstaand schema:

- continue visuele en acoustische (zintuigelijke) bewaking,
- lagerconditiemeting, elk kwartaal,
- oliewissel, jaarlijks; controle op metaalverontreiniging.

Door tijdig ingrijpen is grote (volg-)schade steeds voorkomen, maar het moment van de actie is telkens min of meer ongepland geweest. De voorlopige conclusie is dat alle geregistreerde onderhoudsacties noodzakelijk zijn geweest, daar anders op korte termijn grotere schade te verwachten viel. De gegevens kunnen daarmee gebruikt worden ter bepaling van het faalgedrag.

Een storing van enige importantie wordt gevolgd door een totale revisie van de TWK. Alle onderdelen worden daarbij gecontroleerd en indien noodzakelijk vervangen, zodat aannemelijk is dat de TWK na revisie zo goed als nieuw wordt opgeleverd.

De registratie omvat een periode van 9 jaar. Een deel van de geregistreerde storingen blijkt incidentele gebeurtenissen te betreffen. De vervanging van een oliekeerring en de revisie van de TWK zijn qua frequentie, respectievelijk qua kosten de belangrijkste onderhoudsacties.

Een defecte oliekeerring heeft niet onmiddellijk ernstige gevolgen. Herstel kan altijd worden uitgesteld tot een geschikt moment tussen twee batches in. Gezien de reparatieduur hoeft er (vrijwel) geen oponthoud te zijn in de productievoortgang. Dat wil zeggen dat er ook in geval van S.A.O., geen O.A.K. zijn. De kosten voor een correctieve

vervanging zijn daarmee even hoog als voor een preventieve vervanging, de kostenratio $K=1$, en daarmee is een preventieve politiek voor deze component apart niet zinvol.

Opportunistische vervanging, bijvoorbeeld tijdens een revisie van de TWK als geheel, is wel zinvol. Zoals uit de registratie blijkt wordt het faalgedrag (slijtage) gekenmerkt door een toenemende faalintensiteit. De kosten voor preventieve vervanging bestaan in dat geval alleen uit materiaalkosten, de dan geldende kostenratio is zeer hoog. Daarmee is de te volgen onderhoudspolitiek ten aanzien van dit onderdeel bepaald. Het als aparte component opnemen van een component 'oliekeerring' in het model is niet zinvol.

Wij beschouwen nu de revisie van de TWK als geheel. Ascher en Feingold [1984] voeren aan dat informatie afkomstig van parallelsystemen bij voorkeur per tak verwerkt moet worden, omdat eventuele verschillen in faalgedrag (b.v. door een verschil in belasting) op deze wijze kunnen worden onderkend. In tweede instantie worden dan de deelresultaten gecombineerd tot een totaalresultaat. Per TWK is echter te weinig informatie voorhanden om het faalgedrag per tak te kunnen kwantificeren (1-2 niet gecensureerde waarnemingen). De procesvoering is echter zodanig dat voor alle TWK's een gelijksoortige belasting mag worden verondersteld. De gegevens zijn daarom gecombineerd verwerkt.

In totaal blijkt over 71 revisies gerapporteerd te zijn, hetgeen 29 niet gecensureerde waarnemingen oplevert. De overige waarnemingen zijn gecensureerd: ofwel is niet exact bekend wanneer de TWK in gebruik werd genomen, ofwel de TWK is op het moment van de analyse nog in bedrijf. Een trend in de gerealiseerde standtijd kan niet worden aangetoond. Onderlinge afhankelijkheid van de gegevens is door het geringe aantal niet aantoonbaar, maar is door de gescheiden configuratie van de objecten uitgesloten.

De revisierapportage wijst uit, dat het defect raken van een taatslager door vermoeding van het loopvlak de belangrijkste aanleiding vormt tot een revisie. Voor een dergelijk faalmechanisme wordt in de literatuur een vormfactor van 2 - 3 genoemd, Bitter [1977], Yoshikawa [1975]. Het opmerkelijke patroon in de plotposities op Weibullpapier suggereerde dat er meer dan één 'faalmechanisme' actief moest zijn. In een tweede overlegronde kwam inderdaad naar voren dat in het besluit tot revisie van een TWK niet alleen de feitelijk geconstateerde conditie, doch ook het al gerealiseerde aantal bedrijfsuren werd meegenomen, zoals voor de hand ligt. Bovendien bleek, dat de in eerste instantie opgestelde reparatieprocedure bestond uit het vervangen van de defecte tandwielkast door het reserve exemplaar, waarna de herstelde kast als reserve werd opgelegd. Later is deze procedure gewijzigd, omdat de voor een 'vreemde' TWK benodigde uitlijn-

procedure meer tijd in beslag bleek te nemen dan het reviseren en terugplaatsen van de defect geraakte kast. Door het gebrek aan een sluitende registratie is niet meer te achterhalen welke weg de TWK'n langs de verschillende reactoren hebben afgelegd.

Een nauwgezette controle van de gegevens leverde 51 bruikbare revisierapporten op, waaruit slechts 8 complete waarnemingen gedistilleerd konden worden. Opnieuw zijn de gegevens geplot, met als resultaat:

- min. levensduur, $\gamma = 0$ [dagen],
- vormfactor, $\beta = 4.1$ [-],
- kar. standtijd, $\eta = 3400$ [dagen].

Dit impliceert een gemiddelde standtijd tot aan een revisie van circa 3100 dagen, ofwel 8.5 jaar. Het model van de TWK bestaat hiermee uit één component, de component 'revisie'. Een meer gedetailleerd model op basis van de beschikbare gegevens is niet haalbaar.

In de invulling van het financiële deel van het model is ervan uitgegaan dat het inspectieschema ongewijzigd wordt gelaten, zodat catastrofaal falen ook in de toekomst vermeden wordt. Voor het herstel is een vast aantal manuren verondersteld, want geplande en ongeplande revisie blijken even lang te duren. De materiaalkosten konden eenvoudig worden achterhaald. Voor de O.A.K. voor ongeplande stilstand is een relatief laag bedrag ingeschat. Het uitvallen van één van de 20 reactoren betekent slechts een (tijdelijke) productievermindering van 5 %. Door een buffering van het produkt komt het functioneren van de totale productielijn niet in gevaar. In deze situatie is een relatief lage kostenratio te verwachten; hier geldt $K = 2.42$.

Simulatieresultaten.

Voor dit probleem is simulatie als rekenmethode mogelijk, maar niet noodzakelijk. De TWK is immers gemodelleerd door één component, de component 'revisie'. Ter oriëntering en illustratie is volstaan met de simulatie van een equivalent van 1000 jaar systeemlevensduur, voldaan in één run. In de conclusie worden de simulatieresultaten vergeleken met de uit de literatuur bekende analytische oplossing voor het optimale preventieve interval en het bijbehorende kostenniveau.

Situatie 1: Storingsafhankelijk onderhoud.

In de eerste simulatie is het resultaat berekend van S.A.O.; het moment van revisie wordt bepaald door het faalgedrag van de TWK. Enkele rekenresultaten zijn weergegeven in tabel 6.1, het eerste concept.

Situatie 2: Opportunistisch, gebruiksafhankelijk onderhoud.

In deze simulatie(s) wordt éénmaal per jaar, in een geplande productiestop, de gelegenheid geboden tot een (preventieve) revisie van de TWK. Het criterium daarvoor is het gerealiseerde aantal bedrijfsuren van de TWK op dat moment: opportunistisch G.A.O. In het model is daartoe een tweede (schijn-)component opgenomen, met als functie het initiëren van de jaarlijkse stop. Stapgewijs is een interval van 4 tot 9 jaar gesimuleerd. De resultaten zijn weergegeven in tabel 7.1.

Conclusie:

Preventieve revisie van de TWK blijkt aantrekkelijk. Wanneer deze revisie gepland wordt in een jaarlijkse stop, dan is het optimale interval 6 - 7 jaar. Voor het gehele bestand (20 TWK) zijn gemiddeld per jaar 2.7 geplande en 0.6 ongeplande revisies te verwachten. De kostenbesparing ten opzichte van S.A.O. is circa 26%. Het optimum is betrekkelijk vlak; het te hanteren preventieve interval is niet kritisch. Het revisiemoment kan met enige vrijheid gepland worden.

Onderhouds concept	Aantal revisies per TWK per jaar.			Gemidd. standtijd [jaar]	O.U.K. [%]		O.A.K. [%]	Tot. kosten [%] t.o.v. S.A.O.
	gepland	ongepl.	totaal		manuren	materiaal	prod.derv	
S.A.O.	-	0.116	0.116	8.5	36.5	17.2	46.4	100
G.A.O. 4	0.242	0.007	0.249	4.0	66.4	31.3	2.4	93
opportun, 5	0.218	0.013	0.201	5.0	64.4	30.3	5.3	89
interval 6	0.137	0.029	0.166	5.9	59.0	27.8	13.2	74
[jaar] 7	0.102	0.046	0.148	6.8	53.5	25.2	23.3	76
8	0.073	0.061	0.134	7.4	48.7	22.9	28.3	79
9	0.038	0.089	0.127	7.8	42.3	19.9	37.7	90

Tabel 7.1: Overzicht simulatieresultaten voor S.A.O en opportunistisch G.A.O.

Zoals gesteld, is simulatie van dit probleem niet noodzakelijk, de resultaten zijn direct afleesbaar in de grafieken van Kabir [1987], paragraaf 5.2. Voor een vormfactor $\beta = 4.1$ en een kostenratio $K = 2.42$ wordt een optimaal interval gegeven van 6.9 jaar, de potentiële besparing blijkt uit te komen op circa 24 %.

Paragraaf 7.2: Productielijn.

Het tweede voorbeeld is een productielijn in de procesindustrie. Het is een continu productieproces. Het voorbeeld dateert uit de beginperiode van het onderzoek, zodat er slechts een deel van de huidige mogelijkheden van het onderhoudsmodel in zijn opgenomen. De vraag is of preventief onderhoud aan één of meer componenten in deze lijn economisch gezien zinvol is en of en in hoeverre dat afhankelijk is van de marktsituatie. In dit voorbeeld ligt het accent op de modelbouw.

Modelbouw, kwalitatief en kwantitatief.

Uit de jaaroverzichten van de onderhoudskosten blijkt dat in een productielijn, ten aanzien van het niet en beperkt uitstelbaar onderhoud, een tweetal apparaten, A en B, circa 80 % van de onderhoudskosten veroorzaken (een bevestiging van de 80 - 20 regel, Pareto). Beide apparaten zullen worden gemodelleerd; de systeemgrenzen zijn daarmee eenduidig vastgelegd. Zowel apparaat A als B zijn essentieel voor het instandhouden van de productie, uitval van één van beide betekent onmiddellijk productieverlies, er is geen tussenopslag van het product. Hoewel de processtroom is verdeeld over een aantal parallele takken, is van redundantie geen sprake. Het model is een serieschakeling.

In het eerste apparaat zijn twee typen onderhoudsmodulen te herkennen, twee modulen van het type R en vier van het type S. Beide typen moeten lekkage van het procesmedium voorkomen. Daartoe zijn de modulen samengesteld uit een aantal, zeer nauwkeurig op elkaar pasgemaakte onderdelen. Elke storing binnen dit moduul betekent de vervanging van het totale pakket.

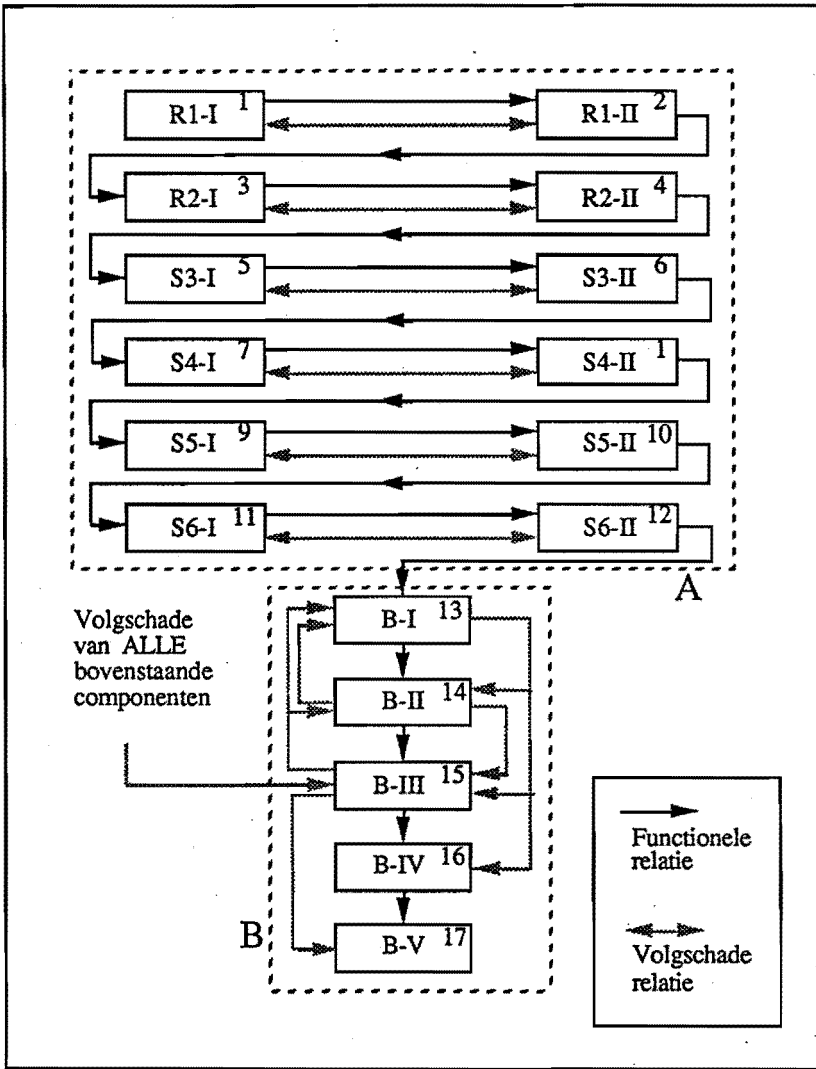
Uit de analyse van de faalgegevens blijken op elk van de modulen een tweetal faalmechanismen actief en na de confrontatie van deze bevindingen met de expertise in de praktijk, is voor het gevonden faalgedrag een zeer plausible verklaring te geven.

Niet alleen is het samenstellen van een moduul een zeer kritische aangelegenheid, ook de vervanging vergt een aantal ingewikkelde handelingen, waardoor soms montagefouten optreden; direct na oplevering bestaat telkens een verhoogde kans op falen. Dit zijn de *inloopverschijnselen of montagefouten* ($\beta < 1$). Daarnaast kan voor elk van de modules degradatie als faalmechanisme worden onderkend, ($\beta > 1$).

Het gehanteerde onderhoudsconcept voor apparaat B bestaat zowel voor correctief als voor preventief onderhoud, uit het tegelijkertijd verwisselen van alle, voor het faalgedrag essentiële onderdelen; de componenten die apparaat B zullen modelleren zijn dus te combineren in één moduul. Uit de analyse van de faalgegevens kan een degradatieverschijnsel ($\beta = 3.14$) herkend worden: vermoeiing van een lagerloopvlak, met als gevolg het uitbrokkelen van metaaldeeltjes. Verder zijn een aantal andere, min of meer incidentele oorzaken te modelleren als één component met een faalgedrag dat gekenmerkt wordt door een relatief grote variatie in standtijd ($\beta = 1.55$). De faaloorzaak blijkt bepalend voor de (financiële) gevolgen van een storing. Zo veroorzaakt het uitbrokkelen van het lager een ernstige verontreiniging van het produkt, met als gevolg een verminderde marktwaarde. Verder blijkt het apparaat een aantal malen geopend te zijn voor onderzoek. Deze projectmatige vervangingen zijn in eerste instantie ook gemodelleerd, maar gezien het tijdelijke karakter van dat project is het uiteindelijke model hiervoor gecorrigeerd.

Telkens nadat er onderhoud aan het systeem is verricht, blijkt er een niet te verwaarlozen kans op overbelasting bij de start: dit is *het opstartverschijnsel*. Dit risico moet gesimuleerd worden, daar de (economische) consequenties relatief groot zijn, daarom is voor dit faalmechanisme in het model een schijncomponent opgenomen, waarvan de faalverdeling gekenmerkt wordt door een sterk afnemende faalintensiteit ($\beta \ll 1$).

Voor de modellering van beide apparaten is een serieschakeling van 17 (schijn) componenten gebruikt, 12 voor apparaat A en 5 voor B, waarvan 1 voor het opstartverschijnsel. De componenten 1/2 en 3/4 modelleren de twee R modules. De componentcombinaties 5/6, 7/8, 9/10 en 11/12 modelleren de S modules. In apparaat B is component 13 verantwoordelijk voor het degradatieverschijnsel, component 14 is opgenomen voor de incidentele storingen en component 15 modelleert het opstartverschijnsel. De schijncomponenten 16 en 17 zijn opgenomen om het verschil in herstelkosten correct te simuleren. Beide hebben geen aandeel in het faalgedrag van het systeem. De onderlinge afhankelijkheid maakt de formulering van een groot aantal volgschaderelaties noodzakelijk, zo is 15 volgschadecomponent van alle andere componenten (m.u.v. 16 en 17). Het uiteindelijke model is afgebeeld in figuur 7.1.



Figuur 7.1: Model van het productiesysteem.

De kwantitatieve invulling ten aanzien van het faal- en herstelgedrag is gebaseerd op de beschikbare informatie uit de onderhoudsregistratie, met uitzondering van het opstartverschijnsel. Door een gewijzigd productiepakket werd het gedrag uit de beschouwde periode niet meer maatgevend geacht. Omdat het faalmechanisme als zodanig niet is gewijzigd, is in overleg met de deskundigen de gevonden vormfactor niet gewijzigd, alleen de karakteristieke levensduur van de desbetreffende component (15) in het model is aangepast. De hoogte van de O.A.K. (door productiederving) is een van de

belangrijke factoren in de probleemstelling. Het verschil in correctief en preventief onderhoud komt alleen tot uitdrukking in de lengte van de actieduur. De O.A.K per tijdseenheid zijn voor correctief en preventief onderhoud gelijk verondersteld.

Het onderzoek is gefaseerd uitgevoerd. De uit opgedane ervaring voortgekomen uitbreidingen aan het rekenmodel zijn stapsgewijs aangebracht. Bovendien is gaandeweg additionele informatie beschikbaar gekomen, zowel door de discussie over de eerste rekenresultaten als in de vorm van concrete waarnemingen.

Validering van het faalgedrag op systeemniveau.

De gegevens waarop het eerste model werd gebaseerd betreffen een periode van 5 jaar. Ter validering van het modelgedrag zal het voor die periode gebruikelijke onderhoudsconcept zo goed mogelijk worden gesimuleerd. Op apparaat B is G.A.O. toegepast, naar uit de registratie blijkt gemiddeld eens in de 2020 uur. Aan apparaat A is slechts S.A.O. gepleegd.

Het over een periode van 5 jaar gemiddelde aantal gesimuleerde storingen per component is vergeleken met de realiteit. Dit blijkt redelijk overeen te komen, zie tabel 7.2. Daar waar weinig gegevens voorhanden zijn, is de afwijking het grootst, conform de verwachting.

Component nummer:	Omschrijving Faalmechanisme:	Realisatie Praktijk:	Realisatie Model:	Opm.
A-R 1/3	Inloop/Montage	1.5	3.4	2
A-R 2/4	Degradatie	4.5	5.4	
A-S 5/7/9/11	Inloop/Montage	2.5	3.0	2
A-S 6/8/10/12	Degradatie	32.5	30.5	
B 13	Degradatie	8.0	7.8	
B 14	Diversen	6.7	7.0	
	Preventief	7.3	6.5	
B 15	Opstartversch.	3.7	5.1	1
(B 18	Projectmatig	3.0	3.1)	
	Totaal:	69.7	71.8	

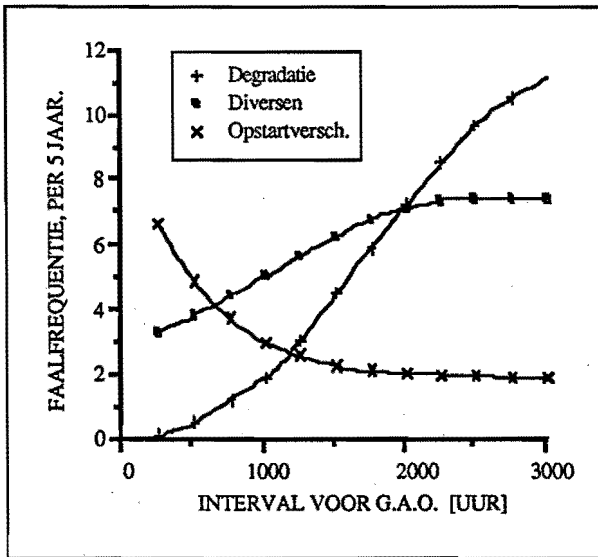
Tabel 7.2: Validering onderhoudsgedrag, faalfrequentie over 5 jaar.

De belangrijkste afwijkingen komen voor rekening van het opstartverschijnsel (1) en het inloopverschijnsel (2). Voor het eerste is de verklaring gegeven en het tweede is, door het weinig frequent voorkomen en de beperkte economische gevolgen, voor de uiteindelijke resultaten minder relevant. Het lijkt daarmee redelijk te veronderstellen dat het faalgedrag en de onderlinge afhankelijkheden op een juiste manier zijn gemodelleerd.

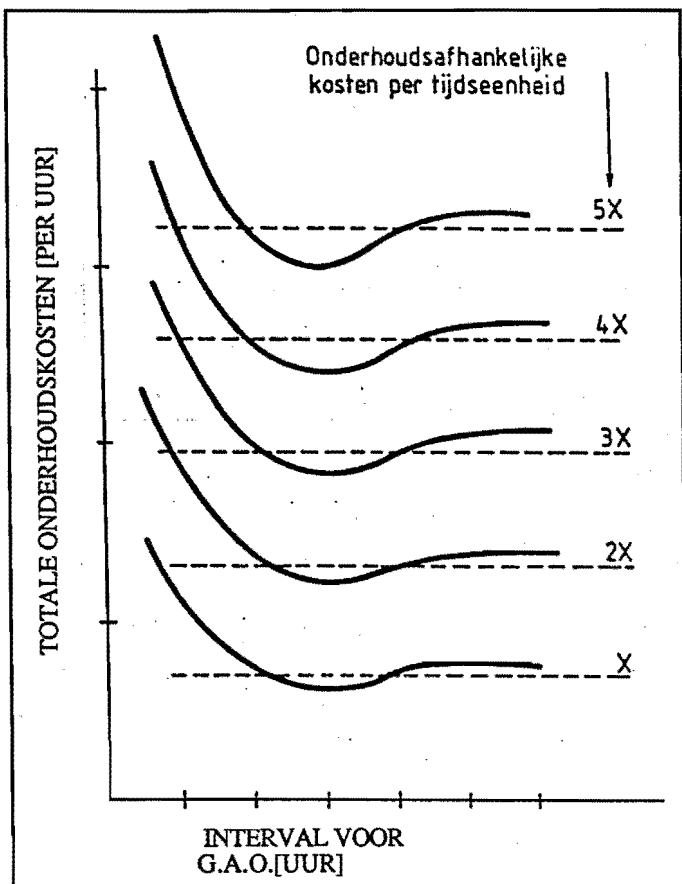
Simulatieresultaten.

Als modelparameters zijn gekozen: het interval voor G.A.O. en de hoogte van de O.A.K. (per uur). Onderzocht is of het gevolgde onderhoudsconcept moet worden aangepast aan de fluctuerende marktsituatie.

Het preventieve deel van het onderhoudsconcept heeft slechts betrekking op B, voor A is (in eerste instantie) een correctieve politiek gesimuleerd. De maximale vormfactor is $\beta = 3.14$, voor component 13. De gemiddelde standtijd van deze component is laag ten opzichte van de overige componenten. Geanalyseerd is of G.A.O. aan apparaat B zinvol is. Enkele resultaten zijn weergegeven in figuur 7.2 en 7.3.



Figuur 7.2: Onderhoudsacties: frequentie en aard versus interval voor G.A.O.



Figuur 7.3: Totale kosten versus interval voor G.A.O.

Een preventieve politiek blijkt vooral zinvol als met hoge O.A.K. gerekend wordt, conform de verwachting. De invloed van het opstartverschijnsel laat zich duidelijk gelden. Indien een korter herstelinterval gekozen wordt, is de kostenstijging groter dan op grond van de herstelkosten alléén mag worden verwacht. Verrassender is dat het optimale interval vrijwel onafhankelijk is van toenemende O.A.K, hooguit een voorzichtige tendens naar een korter interval is herkenbaar. Dit blijkt het directe gevolg van het opstartverschijnsel. De mogelijke winst van een korter interval wordt (meer dan) teniet gedaan door een toenemend aantal (relatief kostbare) stops veroorzaakt door het opstartverschijnsel.

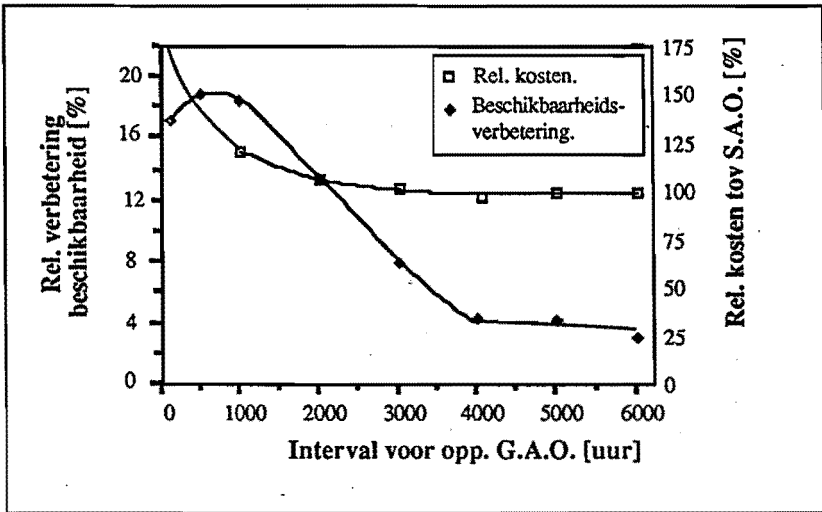
Vervolgstudie na evaluatie van de eerste resultaten.

In een latere analyse is het systeemmodel ongewijzigd gebleven, de kwantitatieve invulling is echter sterk gewijzigd. De parameters van de faal- en herstelverdelingen zijn geëvalueerd door de betrokken experts en op hun aanwijzing gewijzigd. De maximale vormfactor in het model bedraagt nu $\beta = 2.2$. en het verschil in duur van correctieve en preventieve actie is veel kleiner geworden. Opnieuw is geanalyseerd of G.A.O. aan apparaat B zinvol is. De rekenresultaten laten zien dat in deze situatie een systeemstop voor het onderhoud aan deze component economisch gezien niet langer aantrekkelijk is. Dit bevestigt de globale verwachting zoals deze kan worden gebaseerd op de waarden van de verlaagde vormfactor en de verminderde kostenratio.

Vooraf door het opstartrisico ligt het voor de hand het aantal systeemstops zoveel mogelijk te beperken door een opportunistisch onderhoudsconcept. Onderzocht is of het gedrag van component 13 als 'leidraad' kan dienen voor het overige preventieve onderhoud. In de simulatie is het herstelinterval van deze component zodanig gekwantificeerd dat nog juist geen kostenverhoging optreedt ten opzichte van S.A.O. Voor alle overige, geschikte componenten ($\beta > 1$, $K > 1$), is een opportunistische politiek gekwantificeerd. De invloed van het opstart- en montageverschijnsel moet blijken uit de simulatie.

Een kwalitatieve analyse van de resultaten van een dergelijke politiek is eenvoudig, het rekenmodel stelt ons in staat ook kwantitatieve informatie te verkrijgen. In vergelijking met uitsluitend break down onderhoud valt het volgende op te merken:

- Ondanks de invloed van het opstart- en montageverschijnsel neemt het aantal systeemstops af met circa 25 %.
- Door de clustering neemt het aantal componentwisselingen toe, met ongeveer 20 %. Ook de stopduur neemt toe.
- De onderhoudskosten liggen misschien enkele procenten lager (niet significant), ondanks dat met een opportunistisch G.A.O. interval van circa 2000 uur een beschikbaarheidsverbetering ten opzichte van S.A.O. gesimuleerd wordt van circa 13%, zie figuur 7.4.
- Maximale beschikbaarheid en minimale onderhoudskosten worden niet onder identieke condities bereikt.



Figuur 7.4: Relatieve kosten en relatieve beschikbaarheid van opportunistisch G.A.O.

In een volgende simulatiereeks is nagegaan wat de resultaten zijn wanneer wordt overgegaan op uitsluitend opportunistisch onderhoud; alle preventieve onderhoud wordt uitgesteld totdat een (correctieve) gelegenheid zich voordoet. Vergelijken met de oorspronkelijke situatie geven de resultaten opnieuw een afname te zien in het aantal stops (ca. 30 %), het aantal vervangingen neemt toe (ca. 16 %). De totale stilstandtijd voor onderhoud vermindert (ca. 20 %), ondanks een toename in de lengte van de gemiddelde stopduur. In het optimale punt worden 8 % lagere onderhoudskosten berekend. Dit onderhoudsconcept vraagt echter een veel grotere flexibiliteit van de onderhoudsdienst.

Op deze wijze kan stapgewijs worden nagegaan wat gegeven de marktsituatie de juiste politiek is.

Paragraaf 7.3: Dieselmotor voor tractiedoeleinden.

In de meeste praktijktoepassingen bestaat de beperkende factor niet uit de begrensde mogelijkheden van het rekenmodel, maar uit het tekort aan de benodigde informatie. Juist op dit punt wijkt het volgende voorbeeld af, zie Janssen [1986]. Om de in dit geval zeer gedetailleerde informatie volledig te kunnen benutten, zijn in het onderhoudsmodel een aantal aanvullingen aangebracht.

De aard van het vervoersbedrijf maakt een indeling van het correctieve onderhoud naar de ernst van de gevolgen van de storing noodzakelijk. In de beschikbare informatie wordt onderscheid gemaakt in A, B en C-falen. Indien een storing leidt tot onmiddellijke stilstand van een voertuig is dat een A-falen, een stranding. Een spoedreparatie is een defect dat zo snel mogelijk verholpen moet worden, maar waarmee nog wel een herstelwerkplaats te bereiken is: een B-falen. Wanneer met de reparatie van een geconstateerd defect gewacht kan worden tot de eerstvolgende (geplande) gelegenheid is dat een C-defect; het defecte onderdeel wordt bijgeschreven op de 'stoplijst'.

De uit te voeren (opportunistische) onderhoudsacties en de ernst van de gevolgen van het falen hangen nauw samen. Tijdens een stranding bijvoorbeeld zal slechts het minimaal noodzakelijke onderhoud verricht worden, terwijl in een geplande 'beurt' niet alleen de op de stoplijst bijgeschreven componenten vervangen worden, maar er tevens gelegenheid is tot een veelheid aan (periodiek of opportunistisch) onderhoud als inspecties en dergelijke. In paragraaf 4.7 werd de schematische opzet van de simulatie van het onderhoudsconcept voor deze toepassing besproken.

Kwalitatieve modelbouw.

In het model zijn een bijzonder groot aantal afhankelijkheden in faal- en herstelgedrag opgenomen, het directe gevolg van de gedetailleerde opzet. Voor een correcte modellering is een gedegen voertuigkennis noodzakelijk. Een goed voorbeeld daarvan is het volgende. Door het falen van bepaalde onderdelen (bijv. het breken van een drijfstang of krukas) kan een dusdanige volgschade optreden dat een aantal andere, essentiële onderdelen tegelijkertijd moet worden vervangen. In een aantal gevallen is het mogelijk deze onderdelen als (ruil)unit aan te schaffen, bijvoorbeeld het 'shortblock', een 'kaal' motorblok.

In het model is het shortblock te zien als een samenstelling van 51 componenten. Een van de doorslaggevende factoren in de besluitvorming hieromtrent is het afgelegde aantal km. op dat moment. Daarom is in het model het shortblock gemodelleerd als een schijncomponent X, waaraan de 51 relevante componenten onvoorwaardelijk zijn gekoppeld. De schijncomponent X mag nooit aanleiding geven tot een storing. Alleen als één van de voor de vervanging van een shortblock verantwoordelijke componenten faalt, wordt component X gecontroleerd op de momentane bedrijfsduur. Als deze minder is dan de vermelde minimale bedrijfsduur, wordt slechts de defecte component vervangen. In het andere geval wordt component X, inclusief alle afhankelijke componenten, vervangen. De modellering kan niet geheel exact zijn daar in een dergelijke beslissing ook andere

factoren meespelen, zoals de toestand van het transportmiddel als geheel, de periode dat de eigenaar nog van plan is het transportmiddel te exploiteren, etc. In totaal kent het systeem 11 ruilunits.

Kwantitatieve invulling.

Voor de kwantitatieve invulling van het faalgedrag van het model wordt gebruikt gemaakt van de gecombineerde informatie van 117 voertuigen, uitgerust met het te modelleren motortype. Storingen die direct toe te schrijven zijn aan de eindmontage zijn niet gemodelleerd, gezien hun incidentele karakter.

De (gecensureerde) waarnemingen zijn geanalyseerd, geëvalueerd en eventueel gecorrigeerd, waarbij telkens is gekozen voor modellering door één (of meer) Weibull-verdeling(en). Voor onderdelen waarvoor geen faalinformatie voorhanden is, is een minimale levensduur verondersteld die groter is dan de te simuleren levensduur, zodat zij geen aanleiding zullen geven tot storingen. Dit betekent overigens niet dat deze componenten nooit vervangen zullen worden.

Van de mogelijkheid om ook de hersteltijd als stochast te modelleren is geen gebruik gemaakt. Voor de hersteltijden zijn de waarden uit de beschikbare reparatietabel als richtlijn genomen. De duur van de hierin niet voorkomende onderhoudswerkzaamheden is in overleg met betrokkenen geschat. Verder is voor iedere actie een vaste basisduur verondersteld, als verrekening voor het toegankelijk maken van het motorcompartiment en/of voor het eventuele administratieve deel van de werkorder, etc.

De materiaalkosten zijn voor de meeste onderdelen bekend. Een kleine complicatie vormden de ruilunits. In het algemeen zijn modules voordeliger in aanschaf dan een overeenkomstig pakket van losse onderdelen. Bovendien blijkt onder bepaalde voorwaarden een defecte unit inwisselbaar voor een nieuw (of gereviseerd) exemplaar, waarbij de materiaalkosten afhankelijk zijn van de opgetreden schade. Voor de gemodelleerde ruilunits is een correcte invoer van de materiaalkosten mogelijk.

Aan de kostencalculatie is veel aandacht besteed. Door het opportunistische karakter van veel onderhoudsacties -de meeste acties worden geclusterd uitgevoerd- is de berekening en vooral de toewijzing van de O.U.K. en O.A.K. in het model niet minder complex dan in de realiteit. Alleen van de vooraf bekende, gecombineerde onderhoudsacties is de exacte modellering mogelijk. Voor de overige situaties zijn een aantal eenduidige regels geformuleerd, waarbij voor de toewijzing van de kosten de aard van de actie het belangrijkste criterium is.

Onderhoudsconcept.

Naast het correctieve onderhoud worden drie inhoudelijk verschillende onderhoudsbeurten gesimuleerd, conform de praktijk:

- A-beurt - kleine onderhoudsbeurt
- B-beurt - uitgebreide onderhoudsbeurt
- C-beurt - grote onderhoudsbeurt

De B-beurt (periodiciteit 60.000 en 80.000 km.) is een aanvulling op de kleine beurt (20.000 km.). De C-beurt (200.000 km.) is een uitbreiding op de A en B beurt, zie het onderhoudsschema in figuur 7.5.

20 A	40 A	60 A	80 A+B	100 A	120 A	140 A+B	160 A	180 A	200 A+B+C
---------	---------	---------	-----------	----------	----------	------------	----------	----------	--------------

*Figuur 7.5: Onderhoudsschema conform de praktijk (km.*1000).*

De enigszins onregelmatige cyclus kan volledig juist worden gesimuleerd. Een groot deel van de te modelleren preventieve onderhoudsinspanning bestaat uit inspectie en controle van een reeks van onderdelen en functies. De kwantitatieve invulling van dit deel van het onderhoudsconcept is gebaseerd op schattingen van experts.

Verificatie van de kostencalculatie.

De gesimuleerde eenheid is kilometers (*1000). De simulatie omvat een levensduur van 480.000 km. per run; bij een jaarkilometrage van 120.000 km. is dat 4 jaar. Voor een eerste oriëntering zijn per simulatie slechts 100 runs voltooid. De vergelijking van de simulatieresultaten met het voor de invoer gebruikte, waargenomen praktijkgedrag was één van de aandachtspunten in het vorige voorbeeld. Een soortgelijke vergelijking leverde voor dit model bemoedigende resultaten. In dit voorbeeld wordt een vergelijking gemaakt voor de resultaten van de kostencalculatie. Een zo correct mogelijke kostencalculatie heeft in dit model immers veel aandacht gekregen.

In een vergelijking van de simulatieresultaten met bedrijfsgegevens (niet gebruikt in de kwantificering van het model) werd in eerste instantie een belangrijk verschil geconstateerd: het simulatieresultaat leek veel te hoog. Echter, de afgelegde afstand per voer-

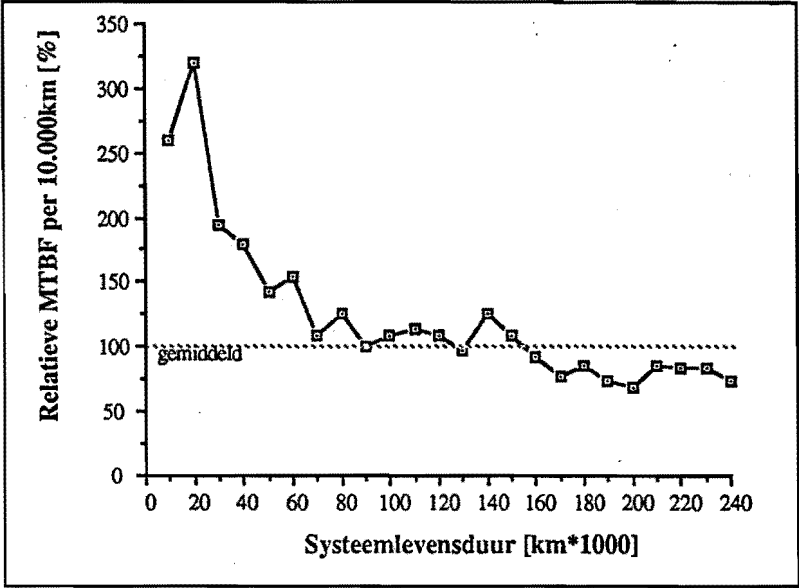
tuig verschilde sterk: van 13.300 tot 204.000 km.; daarmee was het verschil direct te verklaren uit het niet stationair zijn van het systeemgedrag en dus van de onderhoudskosten. De beschikbare bedrijfsgegevens omvatten voor het grootste deel het eerste jaar van de gesimuleerde levensduur en betreffen bovendien het hele transportmiddel. Uit overleg met deskundigen blijkt dat slechts 70-75 % van de totale onderhoudskosten moet worden toegeschreven aan het gemodelleerde, motorische deel. De simulatieresultaten over het eerste jaar blijken na deze correcties op het niveau van 85-90 % van het feitelijk gerealiseerde bedrag uit te komen, zodat (ook) voor de kostencalculatie gesteld kan worden dat de simulatie de werkelijkheid dicht benadert. Benadrukt wordt dat in veel analyses alleen het *relatieve* kostenniveau belangrijk is.

Afgeleide simulatieresultaten.

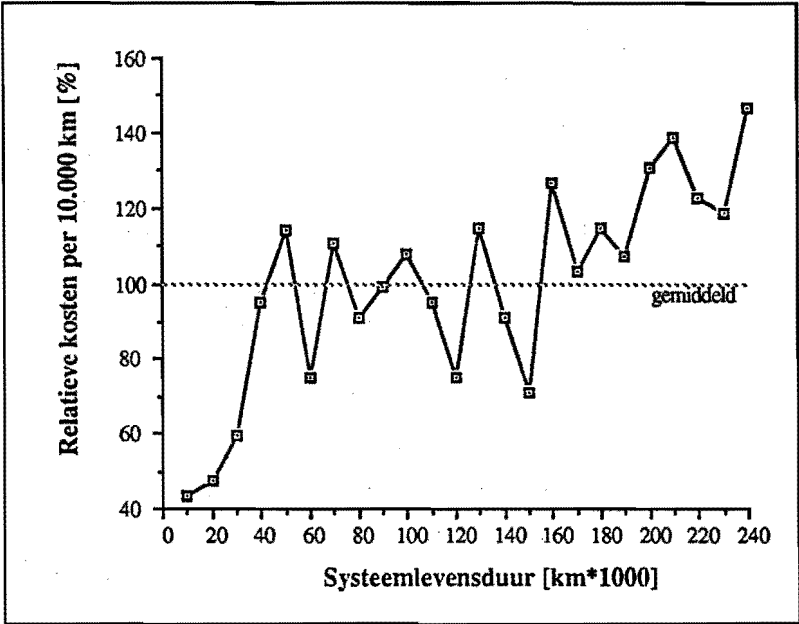
Een aantal kengetallen wordt (standaard) in de resultaten gepresenteerd. Wanneer A en B-falen als storingen gezien worden, dan is over de gesimuleerde periode van 4 jaar (480.000 km.) MTBF bepaald op 100 %. Deze voorstelling van zaken veronderstelt een gedragsevenwicht, maar in figuur 7.6 is weergegeven hoe de gesimuleerde 'MTBF' zich ontwikkelt gedurende de eerste twee jaar, per periode van twee maanden.

Een enigszins constante storingsfrequentie wordt niet bereikt, ondanks het feit dat het aantal componenten in het model groot is (300). Eerst na circa 2.5 jaar lijkt de benadering redelijk, maar op een duidelijk lager niveau dan het in eerste instantie berekende. Door de gemodelleerde inloopverschijnselen is in de eerste periode(n) een lichte toename van de MTBF te constateren.

Het verloop van de onderhoudskosten (gemiddeld per km.) is, door het grote aandeel van de kosten voor het preventief onderhoud, sterk gerelateerd aan de voorgaande figuur, zie figuur 7.7. Over de gesimuleerde periode geldt een lineair stijgende tendens, conform de globale verwachting op basis van het onderhoudsgedrag.

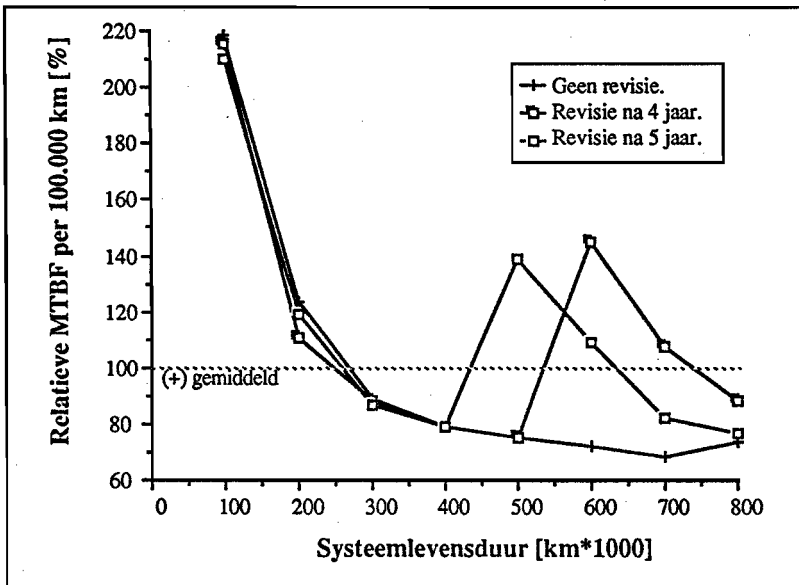


Figuur 7.6: MTBF als functie van de tijd.



Figuur 7.7: Totale onderhoudskosten als functie van de tijd, (O.A.K.=0).

Met het opgestelde model blijken een groot aantal deelanalyses mogelijk. Gesimuleerd is bijvoorbeeld wat de winst is van een fictieve verbetering van de 10, qua onderhoud duurste componenten en wat het effect is van een verandering van het interval voor preventief onderhoud. Verder is een analyse van de verandering van het systeemgedrag na plaatsen van een ruilmotor uitgevoerd. Een ruilmotor bestaat uit meer onderdelen dan een shortblock. Van de resultaten van deze simulatie is een illustratie gegeven in figuur 7.8. Een spronggewijze verbetering in de MTBF (per periode van een jaar) is het gevolg. Een als nieuwe situatie wordt echter niet verkregen, immers niet alle componenten worden vervangen. De spronggrootte is af te lezen, bovendien blijkt de invloed van een ruilmotor op het systeemgedrag na circa 3 jaar teniet te zijn gedaan. Dit blijkt weinig afhankelijk van het feitelijke moment van de plaatsing.



Figuur 7.8: MTBF(t), voor op verschillende momenten geplaatste ruilmotoren.

Bij één van de vervolganalyses zal wat langer worden stilgestaan: het opgestelde model diende als basis voor een onderzoek naar het effect van conditiebewaking op een geselecteerd aantal componenten of clusters van componenten.

Simulatie van conditiebewaking (CB).

Uit een lijst van onderdelen, waarvoor technisch gezien CB mogelijk is, is een 10-tal onderdelen en/of onderdeelclusters geselecteerd. Zoals is omschreven in paragraaf 4.3.2, wordt het effect van CB gesimuleerd door de modellering van een detectieperiode. Voor iedere direct en/of indirect bewaakte component is een (vaste) detectieperiode geschat in overleg met deskundigen, daar feitelijk cijfermateriaal niet of nauwelijks voorhanden is. Voor de meeste componenten is een 100 % kans op detectie verondersteld.

Als de detectieperiode langer is dan het interval tussen twee geplande stops, dan zal het herstel altijd tijdens zo'n geplande stop kunnen worden uitgevoerd. Is de detectieperiode korter, dan kan een tussentijds te plannen systeemstop noodzakelijk zijn. Eventueel kan de iets verderop geplande actie door 'inschuiven' gecombineerd uitgevoerd worden. Om te voorkomen dat de 'beurten' elkaar te snel zouden opvolgen, is een maximale inschuifperiode vastgesteld.

De periodiciteit van de A-, B-, en C-beurten blijft gehandhaafd. Inhoudelijk zijn de onderhoudsacties aangepast, voor bewaakte componenten is de eventuele opportunistische inspectie achterwege gelaten. De actieduur is aan deze wijzigingen aangepast.

In overleg is de runlengte uitgebreid tot 6 jaar, ofwel $6 \cdot 120.000 \text{ km.} = 720.000 \text{ km.}$

Besloten is tot een simulatie van 2000 runs. Het blijkt dat de spreiding in het kostenresultaat ongeveer 25 % van het berekende gemiddelde bedraagt. De verschillende onderhoudsconcepten blijken hier maar weinig invloed op te hebben. Bovendien geldt dat voor de analyse van de problematiek een aantal sterk gerelateerde simulaties worden uitgevoerd. Door vergelijking zijn eventuele uitschieters snel te herkennen. Uit de resultaten op componentniveau kan in veel gevallen achterhaald worden hoe het simulatieverloop is geweest, en wat de reden is van een eventuele afwijking. De nauwkeurigheid van de *rekenmethode* is daarmee circa +/- 1 %, met 95 % zekerheid.

Ter bevordering van de efficiëntie van de simulatie is het systeemmodel enigszins aangepast. De componenten die geen bijdrage leveren in het systeemgedrag en/of de totaalkosten zijn geëlimineerd. Andere, voor deze probleemstelling relevante voertuigonderdelen zijn als component toegevoegd.

Resultaten CB simulatie.

Terdege dient men zich te realiseren dat CB in essentie niet het faalgedrag beïnvloedt, slechts het *onverwacht* defect raken kan worden voorkomen. In de meeste gevallen doet de noodzaak tot vervanging zich even vaak voor. Door het model zijn een drietal potentiële besparingen te simuleren:

- een vermindering van de O.A.K,
- het voorkomen van volgschade,
- het vermijden van vroegtijdig preventief onderhoud.

Een vergelijking van enkele van de gemiddelde simulatieresultaten, met en zonder het geselecteerde CB-pakket, levert het volgende beeld:

- MTBF	ca. 20 % beter,
- MTBM	ca. 2 % beter,
- MTBPM	ca. 9 % slechter,
- Totale kosten	ca. 7 % beter,

Het door de CB gerichte, extra preventieve onderhoud resulteert in een verbetering van de MTBF van meer dan 20 %. Opmerkelijk in de simulatieresultaten is een toename van het totaal aantal acties in het eerste jaar; de vermindering in correctieve acties weegt niet op tegen het toegenomen aantal tussentijds geplande acties. Een soortgelijk beeld wordt verkregen voor de totale onderhoudskosten; een bescheiden, maar reële winst blijkt pas op te treden *vanaf* het eerste jaar. Deze besparing is natuurlijk direct afhankelijk van de ingevoerde O.A.K. Absoluut gezien blijkt de besparing gering.

Paragraaf 7.4: Conclusie.

Toepassing van het model in de praktijk heeft uitgewezen dat de diversiteit in de onderhoudspraktijken bijzonder groot is, maar dat door de flexibiliteit van de methode en het model meestal tot een acceptabele modelvorming kon worden gekomen.

De beschikbaarheid van (betrouwbare) historische faalgegevens is dikwijls minimaal, zodat vrijwel altijd een beroep moet worden gedaan op de aanwezige kennis in de vorm van expertmeningen.

Het welslagen van dat proces is in hoge mate afhankelijk van de acceptatie van de methode en het uiteindelijke model. Deze acceptatie blijkt in hoge mate afhankelijk van vooral de herkenbaarheid in het model van de verschillende 'gereedschappen' en van de verbanden, zoals deze in de onderhoudswereld bekend zijn.

Modelleren van een object vereist steeds een investering, maar als een dergelijk model eenmaal beschikbaar is, is het aantal toepassingen groot. Zo kon in het derde voorbeeld geanalyseerd worden wat de bijdrage is van het CB-systeem per component. De volgende stap is de simulatie van het effect van CB, gecombineerd met de verlenging van het interval tussen de onderhoudsbeurten. Steeds geldt dat een kwalitatieve (deel-) analyse betrekkelijk eenvoudig is, maar alleen een kwantitatieve analyse van het totale systeemgedrag, de voor de besluitvorming noodzakelijke informatie kan verschaffen.

8 INCIDENTEEL PREVENTIEF ONDERHOUD Zoals in een 'grote' stop.

Niet zelden ziet een onderhoudsdienst zich geplaagd voor de beslissing tot het al dan niet uitvoeren van incidenteel, dikwijls grootschalig (en kostbaar) preventief onderhoud, naast het in het onderhoudsconcept omschreven reguliere onderhoud. Een doelstelling kan daarbij zijn het systeemgedrag zodanig te beïnvloeden dat een zo groot mogelijke kans op het storingsvrij functioneren van het systeem bereikt wordt, gedurende een aansluitende, relevante periode. Dit is een bekende situatie voor systemen met een beperkte missieduur (schepen e.d) of voor bedrijven met een campagne-achtige bedrijfsvoering; maar ook voor systemen waarvoor niet meer dan eens per jaar, of zelfs nog minder frequent, de gelegenheid bestaat tot grootschalig onderhoud. Externe omstandigheden, vaak van productietechnische aard, bepalen dikwijls het moment van de actie, de vraag is dan: welke omvang kunnen/moeten de werkzaamheden hebben?

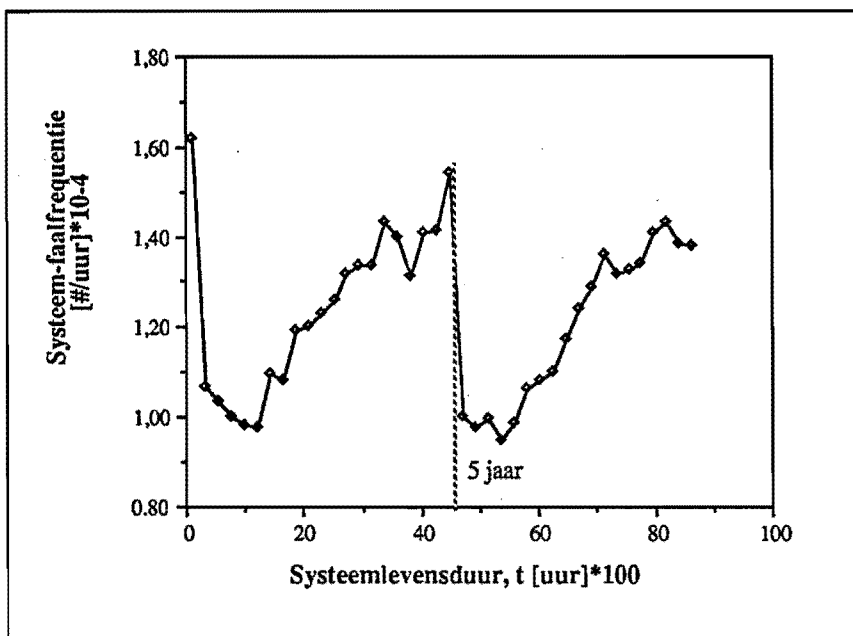
Voor een juiste ondersteuning van de besluitvorming is kwantificering opnieuw een vereiste. Zoals zal worden aangetoond kan het ontwikkelde model ook in de analyse van deze problematiek toegepast worden.

In een kwantitatieve analyse van de geschetste problematiek zijn de volgende overwegingen belangrijk. Door de geleverde onderhoudsinspanning mag een stapsgewijze verandering/verbetering in het systeemgedrag verwacht worden. Deze stapgrootte moet worden bepaald. Bovendien is de verandering in het systeemgedrag tijdelijk van aard, het systeemgedrag vrijwel zeker niet (meer) stationair. Naast de bepaling van de stapgrootte is in veel gevallen het verdere verloop van het systeemgedrag tenminste even essentieel. Voor het voorbeeld uit paragraaf 5.4 is het bedoelde effect afgebeeld, wanneer eens per 5 jaar (43800 uur) een volledige systeemrevisie wordt doorgevoerd.

De lengte van de beschouwde periode is één van de factoren waarmee in de analyse van de gestelde problematiek rekening moet worden gehouden. Verder zal blijken dat ook het beschikbaar zijn van de informatie aangaande de momentane toestand van het systeem belangrijk is.

In dit hoofdstuk is het accent gelegd op de correcte kwantificering van het systeemgedrag. In de praktijk kan aan de resultaten van deze analyse relatief eenvoudig een kostencalculatie gekoppeld worden. In paragraaf 8.1 wordt vastgesteld hoever de uit de

literatuur bekende analytische mogelijkheden reiken om te komen tot een kwantificering van het totale (niet-stationaire) systeemgedrag. De problematiek is ook te simuleren, zie paragraaf 8.2. Enkele mogelijkheden van het ontwikkelde model zullen worden geïllustreerd. Centraal zal de vraag staan hoe, met de uit de analyse voortkomende informatie, een schatting kan worden gemaakt voor de bedrijfszekerheid van een systeem over een qua lengte en ligging te kiezen periode.



Figuur 8.1: Stapsgewijze systeem-gedragsverandering. Revisie na 5 jaar.

Paragraaf 8.1: Niet-stationair systeemgedrag; analytische mogelijkheden.

Stel, het beschouwde moment in de systeemlevensduur aan het begin van een periode met lengte ω , is t_s , zodat de periode het interval $(t_s, t_s + \omega)$ omvat. Wanneer ten tijde t_s de momentane bedrijfstijd van elk van de componenten in het systeem bekend is, dan mag deze informatie niet worden genegeerd omdat een gerichtere analyse dan mogelijk is. Door combinatie ervan met de (uit de historische gegevens) geschatte faalkansverdeling kan de momentane faalintensiteit h_j van elk van de componenten berekend worden. Door vervolgens de gevonden waarden te combineren conform de systeemstructuur (serie

en/of parallelschakeling) kan de momentane faalintensiteit op systeemniveau h_s worden bepaald. Voor een (seriegeschakeld) systeem van n componenten geldt $h_s(t_s) = \sum_{i=1}^n h_i(t_s)$.

De $h_s(t)$ is afhankelijk van de systeemleeftijd, maar voor korte intervallengte Δt mag de faalintensiteit bij benadering constant worden verondersteld. Voor de korte periode $(t_s, t_s + \Delta t)$ is deze informatie toereikend. Het faalgedrag van het systeem wordt gemodelleerd door een exponentiële verdeling en daarmee geldt voor de bedrijfszekerheid van het systeem over de beschouwde periode $(t_s, t_s + \Delta t)$:

$$R(t_s, t_s + \Delta t) \approx e^{-h_s(t_s) \Delta t} \quad (8.1)$$

Is een langere periode relevant, dan mag de invloed van het niet-stationaire karakter van het systeemgedrag niet meer genegeerd worden. De mogelijkheden om langs analytische weg tot een oplossing te komen zullen dan aanzienlijk beperkter blijken te zijn.

Over het niet-stationaire (faal)gedrag van samengestelde systemen blijkt relatief weinig gepubliceerd te zijn; enkele resultaten zijn echter wel bekend. Voortbordurend op het werk van Palm (1943) en van Cox en Smith (1953) levert Drenick (1960) het formele bewijs voor de "centrale limietstelling in de bedrijfszekerheid": een voldoende complex systeem zal na verloop van tijd een zekere gedragsevenwichtstoestand bereiken, gekarakteriseerd door onafhankelijke en identieke, exponentieel verdeelde storingsintervallen (het HPP). Daarmee lijkt statistisch gezien de modellering van het systeemgedrag eenvoudiger naarmate het systeem complexer is. Echter, naast een aantal mathematisch belangrijke voorwaarden, waarvoor naar de publicatie verwezen wordt, gaat Drenick uit van de volgende veronderstellingen:

- een zeer groot aantal componenten, ($n \rightarrow \infty$),
- een zeer lange systeemlevensduur, de evenwichtstoestand wordt asymptotisch bereikt ($t \rightarrow \infty$),
- volledig onderling onafhankelijk componentgedrag.

Aan elk van deze drie veronderstellingen zijn echter praktische bezwaren verbonden, zoals al deels door Drenick zelf in zijn publicatie wordt opgemerkt.

De voorwaarde van een zeer groot aantal componenten, c.q. onderdelen, in een systeem lijkt op het eerste gezicht redelijk, maar in een systeemmodel zullen alleen die onderdelen gemodelleerd worden welke een belangrijke bijdrage leveren aan het systeemgedrag gedurende de te verwachten levensduur. Dit betekent in veel gevallen een

sterke reductie van het aantal componenten in het model. Drenick en later Cox (1962) onderkennen dit en geven correctiemogelijkheden aan voor systemen bestaande uit een beperkter aantal componenten.

Duidelijk mag zijn dat de veronderstelling van een zeer lange levensduur ($t \rightarrow \infty$), voor technische systemen in het algemeen geen praktische betekenis kan hebben. De veronderstelde onderlinge onafhankelijkheid in het faal- en herstelgedrag van componenten is al meerdere malen becommentarieerd in dit proefschrift. Juist wanneer in een model de componenten op een dusdanig gedetailleerd niveau gekozen worden dat op dat niveau het vernieuwingsproces als aannemelijk mag worden verondersteld, is afhankelijkheid zeer waarschijnlijk.

In de publicatie(s) van Drenick e.a. wordt niet gerept over de invloed van enige vorm van preventief onderhoud. Verondersteld is dat de defect geraakte onderdelen onmiddellijk worden vervangen, overigens zonder dat daarvoor reparatietijd wordt verrekend. De vraag blijft op welk tijdstip t^* een systeem de evenwichtssituatie voldoende benadert, in hoeverre het feitelijk aantal componenten n^* , en de onderlinge afhankelijkheden tussen de componenten hierin belangrijk zijn en welke rol de factor onderhoud hierin vertegenwoordigt. Verder wordt gezocht naar kwantitatief inzicht in het uiteindelijke verloop van het niet-stationaire systeemgedrag.

Uitgaande van realistischere veronderstellingen presenteren Blumenthal, Greenwood en Herbach (1971, 1973, 1978), BGH, enkele resultaten van een mathematische analyse van het niet-stationaire systeemgedrag. BGH gaan uit van een beperkt aantal componenten en een eindige systeemlevensduur. Met het hanteren van het SRP als systeemmodel blijft de veronderstelling van de onderlinge onafhankelijkheid ongewijzigd. Zeer opmerkelijk in de analyses van BGH is dat de componenten in het systeem alle *volledig identiek* worden verondersteld, een beperking die resulteert in belangrijke mathematische vereenvoudigingen, maar afbreuk doet aan de praktische relevantie van de resultaten. Evenmin als in de uitgangspunten van Drenick is in de analyse aandacht geschonken aan de invloed van preventief onderhoud op het systeemgedrag. BGH zochten naar een schatting van de kans L als functie van ω , gegeven het tijdstip t_s en het aantal (identieke) componenten n :

$$L = L(\omega; t, n) = \text{Pr}(\text{volgende storing na } (t_s + \omega), \text{ gegeven een storing op } t_s).$$

Zelfs met de vereenvoudiging tot volledig identieke componenten blijven de afgeleide (reeksvormige) uitdrukkingen zeer ondoorzichtig. De bevindingen zijn door de auteurs geïllustreerd voor een aantal uitgewerkte systeemmodellen en weergegeven in de publicaties uit 1973 en 1978. Door de toegepaste transformaties zijn ook deze figuren niet

zonder uitleg te interpreteren, verwezen wordt daarom naar de publicatie uit 1973, waarin ook een aantal voorbeelden voor het gebruik van de resultaten wordt gegeven.

Een van de eerste conclusies van BGH is dat het feitelijke aantal componenten een minder belangrijke invloedsfactor is in het niet-stationaire systeemgedrag dan de systeemleeftijd t . Dit kan evenwel een direct gevolg zijn van de veronderstelling dat het systeem bestaat uit volledig identieke en onafhankelijke componenten. Na een zekere periode zal elk van de samenstellende vernieuwingsprocessen (min of meer tegelijkertijd) de evenwichtssituatie bereiken en dientengevolge is dan ook voor het SRP een stabiel gedrag te verwachten. Dit evenwicht wordt weliswaar sneller bereikt naarmate het systeem meer componenten bevat, maar in de analyse van BGH is een grote gevoeligheid voor het feitelijke aantal componenten niet te verwachten.

BGH onderzochten systemen met $n=256$ en $n=64$ componenten, waarbij de resultaten vergeleken zijn met de limietsituatie voor $n \rightarrow \infty$. Niet gerapporteerd werd over systemen met een geringer aantal componenten. In de opgestelde reeksvormige uitdrukking voor L blijkt een steeds groter aantal (correctie)termen nodig te zijn. Een vergelijking van enkele, slechts in aantal componenten verschillende, systemen laat zien dat de afwijking van het systeemgedrag in de aanloopfase, vergeleken met de evenwichtstoestand, groter is naarmate een systeem minder componenten omvat. De simulatieresultaten van systemen met 64, 16, 4 en 1 identieke component(en) illustreren dit effect, zie figuur 8.2.

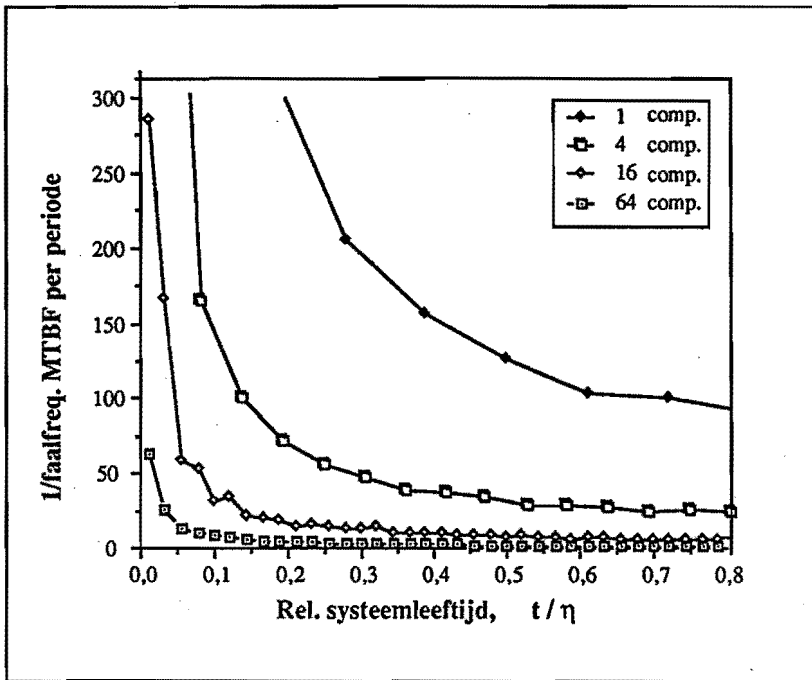
De conclusie dat voor het systeemgedrag het aantal componenten in het systeem als ondergeschikt aan de systeemleeftijd is te beschouwen, is daarmee niet juist.

Uit de resultaten van BGH blijkt verder dat het systeemgedrag slechts langzaam convergeert naar de evenwichtswaarde. In een onderzoek naar combinaties van t^* met n^* , waarvoor het klassiek gehanteerde HPP een goede benadering is van het feitelijke systeemgedrag, komen BGH tot de conclusie dat vele systemen de evenwichtstoestand normalerwijze niet zullen bereiken, eenvoudig omdat de economische en/of de (proces-) technische levensduur al veel eerder verstreken zullen zijn. Daarmee is het HPP als systeemmodel in het algemeen onbruikbaar! De verleidelijke (mathematische) eenvoud van dit model brachten BHG ertoe één van hun artikelen (1978) de titel "The curse of the exponential distribution in reliability" mee te geven.

Verder blijkt het verschil in systeemgedrag tussen het als HPP gemodelleerde systeem en de door BGH gevonden resultaten vooral in de aanloopfase zeer groot te zijn. De kans dat een systeem zal falen blijkt kort na de ingebruikname *vele malen* geringer dan in de evenwichtstoestand. Illustratief voor het verschil is figuur 8.1. Dit heeft belangrijke consequenties voor het in dit hoofdstuk gestelde probleem. Voor elk van de componen-

ten waaraan preventief onderhoud is gepleegd, geldt dat hij na onderhoud ten tijde t_s als nieuw wordt beschouwd. De door preventief onderhoud geïntroduceerde, gedeeltelijke vernieuwing introduceert (opnieuw) de synchroniteit in componentleeftijd welke verantwoordelijk is voor het niet-stationaire effect.

Misschien ten overvloede wordt erop gewezen dat het wel of niet-stationair zijn van het systeemgedrag niet een indicatie kan zijn voor het al dan niet uitvoeren van het hier bedoelde onderhoud.



Figuur 8.2: Invloed van het aantal (identieke) componenten op het systeemgedrag,

Hoewel BGH in hun publicaties de weg aangeven waarlangs een analyse van het niet-stationaire gedrag van samengestelde systemen, bestaande uit niet volledig identieke componenten, zou kunnen verlopen, worden geen resultaten vermeld van afgerond onderzoek in die richting. Ook Asher en Feingold (1984) geven aan dat voortgaand onderzoek in deze richting van belang is: geen enkel reëel systeem bestaat immers uit volledig identieke onderdelen. Asher(1976) illustreert de consequentie van de uitgangspunten van BGH door, gebruikmakend van hun resultaten, uit te rekenen dat een auto-mobiel die na 150.000 km de gedragsevenwichtstoestand bereikt, theoretisch een faal-

frequentie zou moeten hebben van circa 5 storingen per bedrijfsuur! Deze niet realistische uitkomst toont duidelijk de noodzaak van een meer correcte modelvorming aan.

Concluderend: opnieuw blijkt een analytische benadering van de gestelde problematiek slechts mogelijk onder de veronderstelling van een aantal belangrijke systeemvereenvoudigingen. In de praktijk lijkt voor samengestelde systemen een analytische oplossing alleen mogelijk als ten tijde t_s de momentane levensduur van alle componenten in het systeem bekend is en het niet-stationaire effect van het systeemgedrag verwaarloosd mag worden. Dit geldt alleen voor de situatie dat de periode $(t_s, t_s + \omega)$ zeer kort is, de eventuele afhankelijkheden in componentgedrag zijn dan ook minder belangrijk.

Als het niet-stationaire deel van het systeemgedrag wel van belang is, lijkt een (praktisch relevante) analyse slechts mogelijk door simulatie. Wanneer bovendien de invloeden van het reguliere preventieve onderhoud op het systeemgedrag moeten worden gemodelleerd, is simulatie de *enige* methode in de analyse van de geschetste problematiek.

Paragraaf 8.2: Niet-stationair systeemgedrag; simulatie mogelijkheden.

Het simulatiemodel kent belangrijk minder beperkingen dan in het model van BGH moesten worden verondersteld. Zo is er een grote vrijheid in de keuze van het (doorgaans onderling sterk verschillende) faalgedrag van de componenten. Daarnaast kan er tegemoet gekomen worden aan de afhankelijkheden tussen die componenten en bovendien is het effect van preventief onderhoud zichtbaar te maken.

In het ontwikkelde model wordt het niet-stationaire systeemgedrag (standaard) berekend en weergegeven over de totale, als systeemleeftijd gesimuleerde levensduur. Daartoe wordt deze levensduur opgedeeld in een (te kiezen) aantal intervallen. De faalfrequentie van het systeem $h_S(t)$, is tijdsafhankelijk; verondersteld wordt dat voor een kleine intervallengte Δi de momentane faalfrequentie $h_S(t, t + \Delta i)$ bij benadering constant is. Door over alle runs het aantal correctieve en preventieve acties per interval te sommeren, kan tot een schatting worden gekomen van de dan geldende faalfrequentie van het systeem. Door gebruik te maken van de mogelijkheden van het onderhoudsmodel, kan bijvoorbeeld in de besluitvorming rond het al dan niet vervangen van een component rekening gehouden worden met zijn momentane bedrijfstijd of conditie. Een op de geschetse wijze gesimuleerd resultaat werd weergegeven in figuur 8.1.

In combinatie met de lengte van de te beschouwen periode $(t_s, t_s + \omega)$ kan met de zo verkregen informatie een schatting worden gemaakt van de bedrijfszekerheid van dat systeem. Hiertoe worden de grenzen van een interval gedefinieerd door t_1, t_2, \dots, t_n .

Het tijdstip t_s is het begin van de periode $(t_s, t_s + \omega)$. Voor $t_j < t_s < (t_{j+1})$ en $t_j < (t_s + \omega) < (t_{j+1})$ geldt 8.2, mits $j > (i+1)$. De eerste en laatste term zijn de bijdragen in storingskans voor de intervaldelen tussen (t_j, t_{j+1}) en (t_j, t_{j+1}) , de middenterm verrekent het aantal intervallen dat volledig binnen $(t_s, t_s + \omega)$ ligt. Uitgaande van een constante faalfrequentie over elk van de intervallen is een schatting van de bedrijfszekerheid van het systeem over de beschouwde periode te maken door:

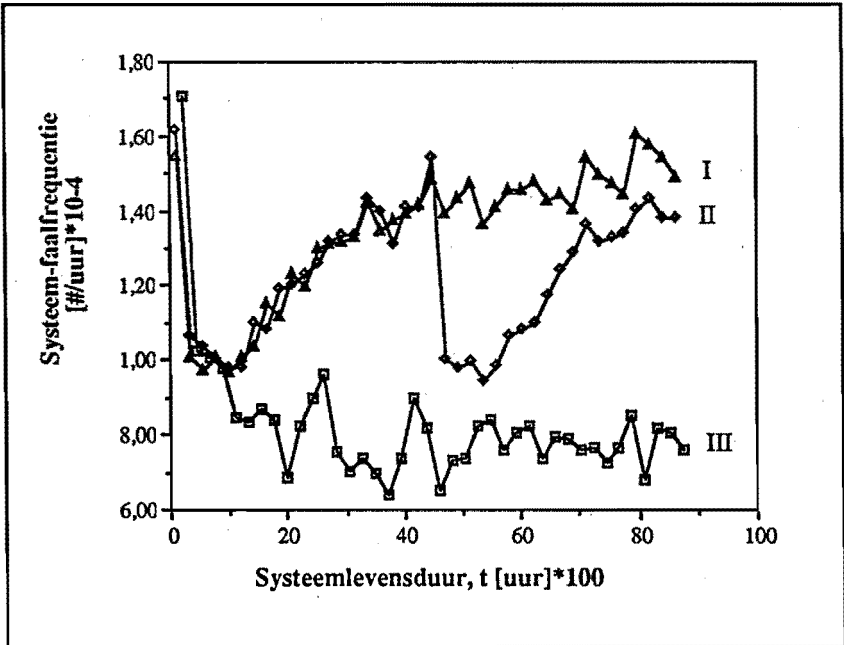
$$R(t_o, t_o + \omega) = e^{-h_s(t_s, t_{i+1}) \cdot (t_{i+1} - t_o)} * \prod_{k=i+1}^{j-1} e^{-h_s(t_k, t_{k+1}) \cdot (t_{k+1} - t_k)} * e^{-h_s(t_j, t_{j+1}) \cdot ((t_o + \omega) - t_j)} \quad (8.2)$$

Voor het geval dat $j=i+1$ vervalt de middenterm en als $j=i$ moet gerekend worden met:

$$R(t_o, t_o + \omega) = e^{-h_s(t_s, t_{i+1}) \cdot ((t_o + \omega) - t_o)} = e^{-h_s(t_s, t_{i+1}) \cdot \omega} \quad (8.3)$$

Een beperkte illustratie zal worden gegeven voor het systeem uit paragraaf 5.4, dat is opgebouwd uit 8 qua faalgedrag verschillende en deels afhankelijke componenten. In het model is een negende (schijn)component toegevoegd ter initiatie van t_s . In figuur 8.3 is afgebeeld hoe de faalfrequentie van het systeem als functie van de tijd varieert.

Lijn I in de figuur geeft het gedragspatroon aan wanneer alleen S.A.O. wordt uitgevoerd. Opvallend is de sterke afname in faalfrequentie in de aanloophase, het gevolg van de gesimuleerde montagefouten. Lijn III geeft dezelfde grootte weer, maar nu is gesimuleerd dat eenmaal per jaar, ten tijde t_s , alle aan slijtage onderhevige componenten preventief worden vervangen. Het grillige verloop van deze curve in vergelijking met de beide andere is een gevolg van het geringere aantal runs dat hier is gebruikt (1000 i.pl.v. 5000). Ook de situatie dat deze revisiefrequentie wordt verminderd tot één maal per vijf jaar is weergegeven. Na de stapsgewijze verandering in het systeemgedrag wordt een korte, betrekkelijk stabiele fase gesimuleerd; de toename van de kans op falen door slijtage wordt gecompenseerd door een afname van de kans op montageverschijnselen.

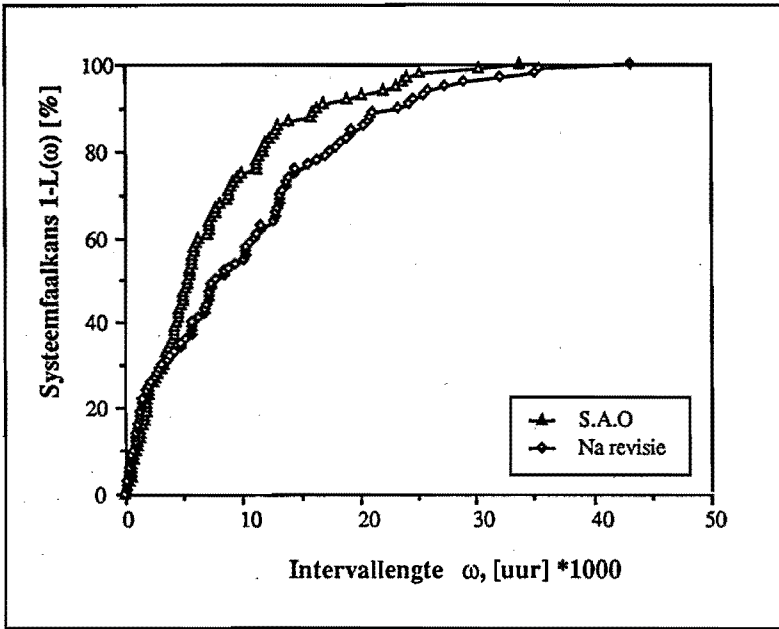


Figuur 8.3: Systeemfaalfrequentie, S.A.O. en G.A.O, revisiefreq. eens per jaar.

Uit deze informatie kan met behulp van 8.2 of 8.3 een globale schatting worden gemaakt van de bedrijfszekerheid van het systeem over de beschouwde periode, $R(t_s, t_s + \omega)$.

De door BGH gezochte uitdrukking voor de kans $L(\omega)$, kan ook op meer directe wijze benaderd worden. Door het programma te laten rapporteren over de periode tot aan de eerste storing na t_s , kan een schatting worden verkregen voor het faalgedrag van het systeem, als functie van de periodelengte ω . De invloed van de lengte van de beschouwde periode is direct zichtbaar, het moment t_s is bekend verondersteld. In figuur 8.4 is afgebeeld wat het effect is op de gezochte kans waarbij $t_s = 43800$ uur, ofwel 5 jaar.

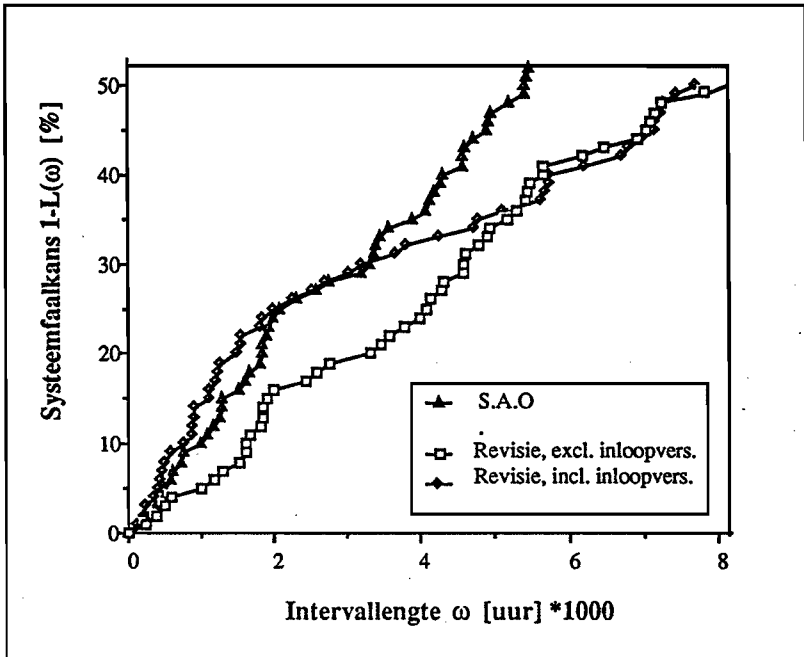
Een systeemrevisie eens in de vijf jaar resulteert inderdaad in een vermindering van de faalkans van het systeem, ofwel een toename in de bedrijfszekerheid, maar zoals blijkt niet onmiddellijk na de (her)oplevering! Dit is een gevolg van de gesimuleerde kans op een storing door montageverschijnselen, na de oplevering van het systeem, paragraaf 5.4.



Figuur 8.4: Faalkansverdeling, vanaf $t_s=43800$ uur, met en zonder systeemrevisie .

Zoals gesteld zijn in een analytische oplossing dergelijke effecten niet of nauwelijks te verwerken. Het negeren ervan kan echter misleidende resultaten opleveren, zoals blijkt uit figuur 8.5. Hier is het verloop van de storingskans gedurende het eerste jaar na het revisiemoment t_s afgebeeld, gesimuleerd met en zonder inloopverschijnselen.

Er blijkt voor dit systeem, in vergelijking met de situatie waarin alleen S.A.O. wordt verricht, een vergrote kans te bestaan op falen gedurende de eerste 6 maanden na heringebruikname. Pas over een langere periode is de bedrijfszekerheid van een gereviseerd systeem hoger dan in de situatie waar alleen correctief onderhoud gepleegd wordt. Wanneer de afhankelijkheden in het model worden genegeerd, verdwijnt dit verschijnsel. Als gevolg daarvan wordt gedurende de eerste 9 maanden een te geringe kans op falen berekend, waarbij afwijkingen tot circa 30 % voorkomen. Opnieuw geldt dat een kwantitatieve benadering slechts door simulatie mogelijk is.



Figuur 8.5: Deel van de faalkansverdeling $F(t)$, $t_s=43800$ [uur], gesimuleerd met en zonder inloopverschijnselen.

Zoals werd gesteld is een meer gerichte analyse mogelijk wanneer ten tijde t_s de momentane bedrijfstijd van elk van de componenten in het systeem bekend is. Deze informatie mag, voor een zo correct mogelijke kwantificering van de geanalyseerde problematiek, niet worden genegeerd. De invloed op het systeemgedrag van de onder het preventieve deel van het onderhoudsconcept ressorterende componenten, is immers in veel gevallen beperkt. Hoewel het programma hiervoor niet is toegerust, kan het door een relatief geringe modificatie zodanig worden aangepast, dat ook die informatie optimaal te benutten is. Gebaseerd op de momentane bedrijfstijd en de ingevoerde faalkansverdeling kan voor de componenten een resterende standtijd worden gesimuleerd, welke dan als eerste faaltijdstip geldt, gerekend vanaf het moment t_s . De ingevoerde systeemtoestand moet dan voor elke run opnieuw als beginsituatie fungeren.

Een verdergaande modelaanpassing is denkbaar door de inbreng mogelijk te maken van informatie over de momentane componentconditie. Door het stochastische karakter van de gesimuleerde detectieperiode kan in het model ook hieraan tegemoet gekomen

worden. Het beperkt beschikbaar zijn van de benodigde informatie maakt dat een dergelijke modificatie naar alle waarschijnlijkheid minder praktische waarde zal hebben.

Het model is door deze modificatie(s) geschikt te maken voor een directe ondersteuning in de besluitvorming aangaande het moment en de omvang van de uit te voeren werkzaamheden in een praktijksituatie. Daarmee kan een belangrijke praktische dimensie worden toegevoegd.

9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het onderwerp in dit promotieonderzoek betrof het ontwerp en de toepassing van een kwantitatief model voor de beschrijving van het stochastische faal- en herstelgedrag van complexe systemen, met onderhoud als expliciete factor. Beoogd is een stuk gereedschap te ontwikkelen, dat in de bedrijfspraktijk bruikbaar is, bijvoorbeeld voor het analyseren van het effect van een ontworpen onderhoudsconcept of voor de evaluatie van een systeemmodificatie. In paragraaf 9.1 zijn de belangrijkste conclusies uit de voorgaande hoofdstukken verzameld. Paragraaf 9.2 bevat enkele aanbevelingen waaraan in een vervolgstudie aandacht geschonken kan worden.

Paragraaf 9.1: Conclusies.

Ondanks de onmiskenbare relatie tussen onderhoud en het gedrag van samengestelde, repareerbare systemen is onderzoek op dit terrein beperkt; ook zijn de resultaten van dergelijk onderzoek zeer fragmentarisch beschikbaar. Bovendien blijken veel van de inspanningen gericht te zijn op vooral een kwalitatieve beschrijving. Alleen de kwantificering van het gedrag van enkelvoudige systemen heeft veel aandacht gekregen, gezien de hoeveelheid beschikbare literatuur hierover. Voor dergelijke systemen is het optimale onderhoudsconcept eenduidig te bepalen, mits voldoende informatie over het faal- en herstelgedrag bekend is.

Voor samengestelde systemen is de modellering en met name de analyse van het faal- en herstelgedrag gedurende de levensduur complex. De mogelijkheden om langs analytische / wiskundige weg tot een kwantitatieve oplossing te komen zijn begrensd. Telkens blijkt dat voor deze aanpak een aantal vereenvoudigingen nodig zijn, die voor de modellering van het effect van onderhoud op het systeemgedrag verstrekkende beperkingen inhouden. De vooralsnog enige geschikte methode is simulatie van het systeemgedrag.

Onderhoud is een op onderdeelniveau uitgevoerd proces. Een onderhoudsmodel vereist dus modellering op datzelfde niveau en dit heeft tot gevolg dat voor een correcte analyse van het systeemgedrag dikwijls gerekend moet worden met een groot aantal verschillende componenten. Bovendien bestaan er tussen die componenten belangrijke

afhankelijkheden, waardoor de bekende, op componentniveau geldige optimaliseringsregels voor de uitvoering van onderhoud aan het object als geheel niet zonder meer toepasbaar zijn.

De uiteenlopende mogelijkheden in de onderhoudspraktijk worden in het model weerspiegeld door het bijzonder grote aantal parameters waarmee moet worden gewerkt. Hierdoor is het praktisch gezien vooralsnog onmogelijk een mathematisch 'optimaliseringsproces' zo te laten verlopen, dat daarmee automatisch het 'optimale' onderhoudsconcept wordt gevonden. Telkens blijkt voor een 'optimalisatieproces' de inbreng van de onderhoudsexpert onmisbaar, ook al omdat meestal met randvoorwaarden als overheidsvoorschriften e.d. rekening moet worden gehouden.

Niettemin lijkt in de praktijk een goede benadering van dat optimum toch haalbaar, gezien het feit dat het gedrag van veel technische systemen betrekkelijk ongevoelig is voor de 'optimale' kwantificering van het gekozen onderhoudsconcept. Voor componentgedrag was dit al eerder aangetoond. Het ontwikkelde model kan aan een dergelijk optimaliseringsproces een belangrijke, kwantitatieve bijdrage leveren, want de nauwkeurigheid van de resultaten is hiervoor zeker toereikend.

Het model is toegepast in een aantal praktijksituaties. Telkens bleek een duidelijke relatie te bestaan tussen de systeemleeftijd en het systeemgedrag. Ook uit de simulaties van (theoretische) systemen blijkt dat een evenwichtssituatie pas optreedt na een relatief lange periode, zeer zeker ten opzichte van de beperkte levensduur van een technisch systeem. Het a priori veronderstellen van een evenwichtssituatie in systeemgedrag is dan ook geen reëel uitgangspunt, temeer daar de feitelijke kans op falen van een systeem met het verstrijken van de levensduur veel hoger kan worden dan het gemiddelde niveau over de gehele gebruiksduur. Deze conclusie is vooral voor veiligheidsstudies van groot belang.

Van de verschillende onderhoudspolitieken heeft in de literatuur de kwantificering van het geplande (periodieke) gebruiksafhankelijke onderhoud relatief veel aandacht gekregen, al dan niet in de vorm van zogenaamde blokvervanging. Toch blijven in de praktijk de toepassingsmogelijkheden van gepland gebruiksafhankelijk onderhoud beperkt tot een reëel gering aantal onderdelen als filters e.d. Van veel groter belang blijkt opportunistische onderhoud, zowel gebruiks- als toestandsafhankelijk.

In veel publicaties wordt het aandeel van toestandsafhankelijk onderhoud in de onderhoudspraktijk een grote toekomst toegedacht. Voor een correcte vergelijking tussen de mogelijkheden van gebruiks- en toestandsafhankelijk onderhoud, moet in het laatste geval de inspectie-inspanning meegerekend worden, terwijl in beide gevallen de mogelijkheid van een opportunistische uitvoering moet worden betrokken. Met name

wanneer met de uitval van een systeem hoge onderhoudsafhankelijke kosten zijn gemoeid, is de uitkomst van een dergelijke vergelijking niet op voorhand te voorspellen.

Paragraaf 9.2: Aanbevelingen voor verder onderzoek.

In de beginfase van deze studie is gezocht naar beschikbare software voor de analyse van het gedrag van complexe systemen, met daarin onderhoud als expliciete factor. Er werden op dat moment geen commerciële pakketten aangetroffen en daarom is begonnen met de ontwikkeling van MAINSITHE. Ongeveer tegelijkertijd zijn binnen de industrie enkele vergelijkbare initiatieven ontplooid en de producten daarvan komen nu beschikbaar. Deze modellen blijken niet altijd specifiek gericht op modellering van onderhoud en zij beschikken zeker niet over dezelfde mogelijkheden als MAINSITHE, maar een kruisbestuiving door middel van het doorrekenen van enkele zorgvuldig geformuleerde testcases kan alleen maar positieve effecten hebben.

In het bijzonder is hierbij gedacht aan het computerprogramma 'MAINOPT', waarvoor de vertegenwoordiging ligt bij Optimis Limited, 139 High Street, Wootton Bassett, Swindon, UK., en het zeer recentelijk gepresenteerde simulatieprogramma 'MIRIAM', waarvoor Scicon Ltd, Wavendon Tower, Wavedon, Milton Keynes, U.K., de wereldwijde licentie bezit. Dit uitgebreide programma is vooral gericht op berekening van de systeembeschikbaarheid en de totale productiecapaciteit, waarbij met een gedetailleerd (gebruiksafhankelijk) onderhoudsconcept rekening worden gehouden. MIRIAM is ontwikkeld in nauwe samenwerking met Stat Oil in Noorwegen.

Voor bestaande objecten is de problematiek samenhangend met de (kwantitatieve) optimalisatie van het onderhoud een nog onopgelost probleem. Hoe bijvoorbeeld moet de stopduur worden bepaald voor de gecombineerde acties in één stop en hoe moeten in dat geval de onderhoudsafhankelijke kosten worden toegewezen naar de gecombineerd vervangen componenten? Wat is de optimale samenstelling van onderhoudsacties, in combinatie met de frequentie van geplande stops?

Ook in de optimalisatie van onderhoud in relatie tot het ontwerp van een systeem zijn vele problemen nog onopgelost. Hoever moet men bijvoorbeeld gaan met het in onderhoudsmodulen opdelen van een object? In een onderzoek naar algemeen geldende wetmatigheden kan een model als MAINSITHE zeker goede diensten bewijzen, maar zeer waarschijnlijk zullen voor elk object de specifieke omstandigheden van doorslaggevende betekenis zijn.

MAINSITHE heeft als rekenprogramma nu het prototypestatus bereikt. Voor de verdere ontwikkeling kan gedacht worden aan het verbeteren van de efficiëntie en aan enkele aanvullingen en uitbreidingen. Zo kunnen de toepassingsmogelijkheden worden verruimd, maar zeker kan ook de gebruikersvriendelijkheid worden verbeterd. Gezien de diversiteit in de onderhoudspraktijk moet er echter niet naar worden gestreefd een universeel toepasbaar model te creëren.

Wat de verruiming van het toepassingsgebied betreft, zou het programma in geval van incidenteel, preventief onderhoud, zoals dat besproken is in hoofdstuk 8, de mogelijkheid moeten krijgen om een concrete, van nieuw verschillende beginsituatie op te nemen en deze te hanteren als uitgangspositie voor elke run. Te denken is ook aan de problematiek van het onderdelenbeheer en inzet van onderhoudspersoneel, waarvoor naar alle waarschijnlijkheid andere uitvoergegevens gewenst zijn. Een zinvolle aanvulling op de uitvoermogelijkheden is zeker de inbreng van grafische mogelijkheden, waarmee de nu volledig numerieke uitvoer op een inzichtelijker kan worden gepresenteerd. Uiteindelijk is een voor de PC / PS geschikte versie van het programmapakket aanbevelenswaardig.

In bedrijfszekerheidsstudies is door de jaren heen steeds weer het gemis aan betrouwbare gegevens een grootste probleem gebleken. Het verzamelen van gegevens is al eens 'de uitdaging voor de jaren 80' genoemd. De aandacht die deze problematiek tot nu toe heeft gekregen is niettemin beperkt en eveneens fragmentarisch. Deze inspanningen zullen versterkt doorgang moeten vinden, waartoe de zich ontwikkelende computerondersteuning van het onderhoudsproces goede mogelijkheden biedt.

Een tenminste even belangrijke ontwikkeling is het voor praktijkgebruik geschikt maken van een uniforme en consistente methode voor het combineren van gegevens van verschillende oorsprong. Waarschijnlijk is deze te vinden in de Bayesiaanse statistiek. Deze ontwikkeling is met name van belang voor de kwantificering van het onderhoudsconcept, daar op het voor onderhoud belangrijke niveau dikwijls verschillende informatiebronnen naast elkaar beschikbaar zijn, met name expertmeningen, waaruit door combinatie de gezochte gegevens kunnen worden gevonden.

Appendix A AFKORTINGEN

A	Availability.
CrA	Criticality analysis.
FHA	Fault hazard analysis.
FMEA	Failure mode and effect analysis.
FTA	Fault tree analysis.
G.A.O.	Gebruiksafhankelijk onderhoud.
HPP	Homogeen Poisson proces (Homogeneous Poisson process).
K	Kostenratio.
MCS	Monte Carlo simulatie.
MTBF	Mean time between failures.
MTBM	Mean time between maintenance (incl. repair).
MTBPM	Mean time between preventive maintenance.
MTFPM	Mean time for preventive maintenance.
MTTM	Mean time to maintain (incl. repair).
MTR	Mean time to repair.
NHPP	Inhomogeen Poisson proces (Nonhomogeneous Poisson process).
O.A.K.	Onderhoudsafhankelijke kosten.
O.U.K.	Onderhoudsuitvoeringskosten.
PHA.	Preliminary hazard analysis.
ROCOF	Faalfrequentie (Rate of occurrence of failures).
RP	Vernieuwingsproces (Renewal process).
S.A.O.	Storingsafhankelijk onderhoud.
SRP	Gesuperponeerd vernieuwingsproces (Superimposed renewal proces).
T.A.O.	Toestandsafhankelijk onderhoud.

Appendix B TERMINOLOGIE

Er is geen algemeen aanvaarde Nederlandse terminologie op onderhoudsgebied. In dit proefschrift is onder andere gebruik gemaakt van onderstaande begrippen.

Bedrijfszekerheid. De kans dat de standtijd of het faalinterval van een systeem dat onder bepaalde omstandigheden wordt gebruikt en onderhouden, een bepaalde tijdsduur overschrijdt. De bedrijfszekerheid is het complement van de *faalkans*.

Betrouwbaarheid. De kans dat een uitspraak juist is, in het bijzonder de kans dat de waarde van een grootte binnen aangegeven grenzen ligt.

Component. Kleinste samenstellende deel in het onderhoudsmodel. Een component kan de modellering zijn van één onderdeel of van een samenstelling van onderdelen (onderhoudsmodule).

Conditie. Toestand van een systeem of een component voor zover het de materiële kenmerken betreft welke het vermogen bepalen zijn functie volgens gestelde eisen te vervullen.

Correctief onderhoud. Onderhoudsacties met als doel een defect systeem in gebruiksgereede toestand terug te brengen.

Falen. Het overgaan van het object van de gebruiksklare in de defecte toestand.

Herstellen. Zie onderhoud.

Inspecteren. Zie onderhoud.

Onderdeel. Kleinste, normalerwijze niet demontabele eenheid in een object.

Onderhoud. Alle activiteiten die ten doel hebben een technisch systeem in de technische staat te houden of terug te brengen, die nodig wordt geacht voor de door het systeem te vervullen functie. Onderscheiden kunnen worden:

- vernieuwen: het uitvoeren van onderhoudsacties aan een al dan niet defect object, met het doel alle beschadigde onderdelen in hun oorspronkelijke staat terug te brengen.
- herstellen: het uitvoeren van onderhoudsacties aan een beschadigd, al dan niet defect object, met het doel één of meer, maar niet alle beschadigde onderdelen in hun oorspronkelijke staat terug te brengen.
- inspecteren: het uitvoeren van onderhoudsacties aan een object, met als doel de werkelijke conditie van één of meer onderdelen vast te stellen.

- verzorgen: het uitvoeren van de onderhoudsacties aan een object, met als doel de gebruiksklare conditie van één of meer onderdelen te handhaven, bijvoorbeeld door reinigen, smeren, verversen, etc.
- vervangen: uitwisselen van een onderdeel of een object tegen een nieuw of hersteld exemplaar.

Object. De materiële verschijningsvorm van het beschouwde technische systeem, samengesteld uit onderdelen.

Onderhoudsconcept. Het stelsel van alle procedures (beslissingsregels, voorschriften, werkwijzen, etc.) dat men hanteert voor het uitvoeren van onderhoudsacties aan een systeem.

Onderhoudsgedrag. Gedrag van een object voor zover dit uit onderhoudsoogpunt gezien relevant is.

Onderhoudspolitiek. Beslissingregel ten aanzien van het tijdstip waarop men preventieve onderhoudsacties aan een component uitvoert, met het doel het faalgedrag van een systeem te beïnvloeden. Elementaire onderhoudspolitieken zijn:

- Storingsafhankelijk onderhoud, S.A.O., waarbij aan een component geen preventieve doch slechts correctieve acties plaatsvinden.
- Gebruiksafhankelijk onderhoud, G.A.O., waarbij preventieve acties aan een component plaatsvinden nadat (minimaal) een tevoren vastgestelde prestatie.
- Toestandsafhankelijk onderhoud, T.A.O., waarbij preventieve acties aan een component plaatsvinden, nadat zijn conditie een van tevoren vastgestelde grens heeft onderschreden.

Onderhoudskosten. Alle uitgaven die voortvloeien uit het onderhouden van een object en de daarmee gepaard gaande productieonderbrekingen. Als onderdeel van de exploitatiekosten. Nader kunnen worden onderscheiden:

- Onderhoudsuitvoeringskosten, O.U.K.: de uitgaven die voortvloeien uit het uitvoeren van onderhoudsacties.
- Onderhoudsafhankelijke kosten, O.A.K.: alle overige uitgaven, alsmede het opbrengsverlies dat het gevolg is van het uitvoeren van onderhoudsacties.

Opportunistisch onderhoud. Samengestelde beslissingsregel binnen het onderhoudsconcept van een object, waarbij het tijdstip van preventieve onderhoudsacties aan een component niet alleen afhangt van zijn eigen faagedrag en/of conditieverloop, maar ook van het tijdstip waarop preventieve en/of correctieve acties aan andere componenten plaatsvinden.

Preventie-interval. Periode tussen twee opeenvolgende preventieve acties.

Preventief onderhoud. Acties met als doel een niet defect systeem in gebruiksgereede toestand te behouden.

Standtijd. Bedrijfsduur tot falen.

Stochastische grootheid. Een grootheid waarvan de onder bepaalde omstandigheden aangenomen waarde niet strikt bepaald en voorspelbaar is, maar waaraan wel een kansverdeling kan worden toegekend.

Systeem. Model van een object, een systeem is opgebouwd uit componenten, onderling samenhangend volgens de functionele structuur.

Vernieuwen. Zie onderhoud.

Verzorgen. Zie onderhoud.

Volgherstel. Het uitvoeren van onderhoudsacties aan componenten die niet defect zijn geraakt als direct gevolg van de belastingen die uit de functieervulling voortvloeien, maar bijvoorbeeld als gevolg van het defect raken van een andere component. Nader worden onderscheiden:

- onvoorwaardelijk volgherstel: vervanging van een component wordt altijd gecombineerd met de vervanging van één of meer andere componenten.
- voorwaardelijk volgherstel: vervanging van een component wordt gecombineerd met de vervanging van één of meer andere componenten, mits daarbij aan één of meer voorwaarden is voldaan. Dit kan zijn dat de als volgherstel te vervangen component op het moment dat de mogelijke vervanging aan de orde is een (minimale) bedrijfsduur moet hebben overschreden, of dat de conditie van de component een zekere grens heeft overschreden.

Voorwaardelijk volgherstel is de modellering van opportunistisch onderhoud.

LITERATUUR

- Abelson, R.P. [1968] Simulation of social behavior. The handbook of social psychology, vol 2. Addison-Wesley.
- Aken, J. van, Smudt, R.P. , e.a. [1984] A reliability-based method for the exploration of maintenance opportunities. 8th Adv. in Reliability Technology Symp., Bradford.
- Ascher, H.E. [1968] Evaluation of repairable system reliability using the 'bad-as-old' concept. IEEE Trans., R-17, pp 103-110.
- Ascher, H.E. [1976] Development of systems reliability models from basic physical / mathematical concepts. In generic techniques in systems reliability assessment, Noordhoff, Leiden. pp 11-27.
- Ascher, H.E., Feingold, H. [1979] Comments on models for reliability of repaired equipment. IEEE Trans. R-28 ,pp 119.
- Ascher, H.E., Feingold, H. [1983] Repairable systems: reliability's stepchild. In reliability in the acquisition process, Marcel Dekker, New York, pp 69-85.
- Ascher, H.E., Feingold, H. [1984] Repairable systems reliability. Marcel Dekker, inc. New York.
- Asselin, S.V., Carlson, D.D. [1977] General application of system event tree analysis to light water reactors. Conf. on Probabilistic Analysis of Nuclear Reactor Safety, Los Angeles. Report no: AND-77-1372 C.
- Austin, J.S. [1986] Cost effectiveness of reliability and maintenance technology. Mainten. Management International 4, pp 175-180.
- Aven, T. [1988] Some considerations on reliability and its applications, Reliability engineering and system safety, pp 215-223.
- Bain, L.J., Engelhard, M., Wright, F.T. [1984] Tests for an increasing trend in de intensity of a Poisson process. IEEE Trans. R.-31, pp 79-83.
- Balaban, H.S. [1978] A stochastic characterization of failure processes under minimal repair. Ph.D. Dissertation, George Washington University.
- Barlow, R.E., Davis, B. [1977] Analysis of time between failures for repairable components. Operations Research Center, Berkeley Univ. of California, ORC 77-20.
- Barlow, R.E., Davis, B. [1979] Total time on test plots. Proc. 24th conf. Design of experiments in army research development and testing, ARP rapport 79-2, pp 361-380.
- Barlow, R.E., Hunter, L. [1960] Optimum preventive maintenance policies. Operations Research 8, pp 90-100.
- Barlow, R.E., Proschan, F. [1965] Mathematical theory of reliability. John Wiley, New York.
- Barlow, R.E., Proschan, F. [1975] Statistical theory of reliability and life testing probability models. Holt, Rinehart, Winston, New York.
- Bergman, B. [1985] On reliability and its applications, Scandinavian. J. of Stat. 12, pp 1-41.
- Birnbaum, Z.W., Saunders, S.C [1969] A new family of life distributions. J. of appl. Prob. 6, pp 319-327.

- Bitter, P. [1977] Technische Zuverlässigkeit: Problematik, Mathematische Grundlagen, Untersuchungsmethoden, Anwendungen. Messerschmitt-Bölkow-Blohm, Springer.
- Bleecke, J.H., Boersma, W.H. [1985] Conditiebewaking en toestandsafhankelijk onderhoud bij de Marine. I² Wtb. no 11, pp 15-18.
- Blumenthal, S.B., Greenwood, J.A., Herbach, L.H. [1971] Superimposed nonstationary processes, J. of app. Prob. 8, pp 184-192.
- Blumenthal, S.B., Greenwood, J.A., Herbach, L.H. [1973] The transient reliability behavior of series systems or superimposed renewal processes. Technometrics 15, pp 255-269.
- Blumenthal, S.B., Greenwood, J.A., Herbach, L.H. [1976] A comparison of the 'bad-as-old' and superimposed renewal models. Management Science 23, pp 280-285.
- Blumenthal, S.B., Greenwood, J.A., Herbach, L.H. [1978] The curse of the exponential distribution in reliability. Proceedings of the 23th conf. Design of experiments in army research development and testing, ARO report 78-2, pp 457-471.
- Bossche, A. [1988] Fault tree analysis and synthesis. Dissertatie, Technische Universiteit Delft, 165 pag.
- Bouzitait [1962] Choix d'une politique d'exploitation dans un ensemble industriel complexe. Cahier du Bureau Universitaire de Recherche Operationelle, no 4.
- Box, G.E., Jenkins, G.M. [1970] Time series analysis forecasting and control. Holden Day, San Fransisco.
- Box, G.E.P., Muller, M.E. [1958] A note on the generation of random normal deviates. The Anal. of Mathematical Statistics 29, 1958.
- Cox, D.R., Smith, W.L. [1953] The superposition of several strickly periodic sequences of events. Biometrics 40, pp 1-11.
- Cox, D.R. [1962] Renewal theory. Methuen, New York.
- Cox, D.R. [1972] The statistical analysis of dependencies in point processes. J. of Roy. Stat. Soc, series B 27, pp 332-337.
- Cox, D.R., Lewis, P.A. [1966] The statistical analysis of series of events. Methuen, New York.
- Directoraat Generaal van de Arbeid [1982]. Storingsanalyse waarom? wanneer? hoe? Voorlichtingsblad nr.2.
- Drenick, R.F. [1960] The failure law of complex equipment. J. of Soc. for Industrial and appl. Math. 8, pp 680-690.
- Duane, J.T. [1964] Learning curve approach to reliablity monitoring. IEEE Trans. 1-2, pp 563-566.
- Dutton, J.M., Starbuck, W.H. [1971] Computer simulation of human behavior. Wiley, New York.
- Efron, B [1967] The jackknife, the bootstrap and other resampling plans. J. of Soc. for Industrial and appl. Math.
- Enden, C. van der, Geraerds, W.M.J. [1987] Terminologie. In Onderhoudsmanagement, Samson, Alphen aan de Rijn.
- English, C. [1988] Inservice reliability estimates from maintenance data. Mainten. Management International, pp 163-173.
- Eurlings, [1989] Oriënterend onderzoek naar softwarepakketten, toegespist op gegevensverwerking. T.U.E. Intern rapport, W-WOP-WO, 8 pag. plus bijlagen.

- Evans, R.A. [1971] Data we will never get. IEEE Trans., R-20, p2.
- Feller, W. [1971] An introduction to probability theory and its applications. Wiley, London.
- Geraerds, W.M.J. [1972] Towards a theory of maintenance, on the organization of logistic support systems. The English University Press Ltd., London, pp 297-329.
- Geraerds, W.M.J. [1985] The cost of down-time for maintenance: preliminary considerations. *Mainten. Management International* 5, pp 13-21.
- Geurts, J.H.J. [1986] On the selection of elementary maintenance rules. *Dissertatie, Technische Universiteit Eindhoven*, 115 pag.
- Giblin, M.T. [1984] Derivation of renewal functions using discretisation. 8th Adv. in Reliability Techn. Symp., Bradford, UK. Atom. Energy Authority.
- Gill, R.D. [1980] Censoring and stochastic integrals. *Mathematical Center Tract. No. 124* Mathematisch Centrum, Amsterdam.
- Gits, C.W. [1984] On the maintenance concept for a technical system. *Dissertatie, Technische Universiteit Eindhoven*, 122 pag.
- Gits, C.W. [1987] Een ontwerp kader voor het onderhoudsconcept. *Onderhoudsmanagement*, D3010.1-34, Samson.
- Glasser, G.J. [1969] Planned replacement: some theory and its application, *J. of Qual. Techn.* V 1-2, pp 110-119.
- Green, A.E., Bourne, A.J. [1977] Reliability technology. John Wiley, New York.
- Grigelionis, B.I. [1964] Limit theorems for sums of renewal processes in queuing theory. Energy publishing house, Moscow-Leningrad, pp 246-266.
- Gross, A.J., Lurie, D. [1977] Monte Carlo comparisons of parameter estimators of the 2-parameter Weibull distribution. *IEEE Trans. R-26*, pp 356-358.
- Guérard, von H.W. [1977] Monte Carlo Simulation technischer Zuverlässigkeit. *Qualität und Zuverlässigkeit*. Carl Hanser Verlag München, no 6, pp 121-144.
- Guide to condition monitoring of machinery [1979] Department of Industry, Committee for Terotechnology, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Gupta, Y., Chow, W.S. [1986] Twenty-five years of life cycle costing theory and applications: A Survey. *Intern. J. of Quality and Rel. Management* 2-3, pp 51-97.
- Hall, P. [1988] Theoretical comparison of bootstrap confidence intervals (with discussion). *The Ann. of Statistics*, vol 16, pp 927-985.
- Hankmann, W., van der Mooren, A.L. [1985] Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt (2), *De Constructeur* 6, pp 64-70.
- Heslinga, G. [1988] Technique for human-error-sequence identification and signification. *Dissertatie, Technische Universiteit Delft*, 168 pag.
- Hollenback, J.J. jr. [1977] Failure mode and effect analysis. *SEA papers 770740*.
- Höfle-Isphording, U. [1977] Zuverlässigkeitsrechnung, Einführung in ihre Methoden. Springer Berlin.
- Hunns, D.M., Daniels, B.K. [1981] Paired comparison and estimates of failure likelihood. *Design Engineering*, IPC Science and Technology Press. Ltd., Guildford, U.K.

- Janssen, B.H. [1986] Verzamelen en analyseren van storingsgegevens vanuit het veld. Symp. Bedrijfszekerheid in het Bedrijfsleven, 5,6 nov. te Arnhem, NVvB.
- Jewell, W.S. [1978] Reliability growth as an artifact of renewal testing. Oper. Res. Center, Berkeley, Univ. of California, ORC 78-9.
- Johnson, N.J. [1978] Modified t-tests and confidence intervals for asymmetric populations, J. of the Am. Stat. Assoc. 73, pp 536-544.
- Kabir, A.B.M.Z, Tamimi, A.A.L. [1988] Inspection policy based on specified fractional dead time. Reliability Engineering and System Safety 21, pp 231-238.
- Kabir, A.B.M.Z. [1987] A new presentation of cost optimal age replacement policies. Reliability Engineering 17, pp. 59-71.
- Kalbfleisch, J.D., Prentice, R.L. [1980] The statistical analysis of failure time data. John Wiley, New York.
- Kaplan, E.L., Meier, P. [1958] Nonparametric estimation from incomplete observations. J. of Am. Stat. Soc. 53, pp 457-481.
- Kapur, K.C., Lamberson, L.R. [1977] Reliability in engineering design. John Wiley, New York.
- Kelly, A [1984] Maintenance planning and control. Butterworths, London.
- Kleijnen, J.P.C. [1971] Variance reduction techniques in simulation. Katholieke Universiteit Tilburg.
- Kleijnen, J.P.C. [1977] Generalization of simulation results: practicality of statistical methods. Katholieke Universiteit Tilburg.
- Kleijnen, J.P.C. [1984] Testing the mean of an asymmetric population: four procedures evaluated. Katholieke Universiteit Tilburg, rap. FEW/138.
- Kleijnen, J.P.C. [1987] Statistical tools for simulation practitioners. Marcel Dekker, inc. New York.
- Kline, M.B. [1984] Suitability of the lognormal distribution for corrective maintenance repair times. Reliability Engineering 9, pp 65-80.
- Krohn, C.A. [1969] Hazard versus renewal rate of electronic items. IEEE Trans. R-18, pp 64-73.
- Kuchi, S., Kaio, N., Osaki, S. [1979] Simulation comparisons of point estimation methods in the 2-parameter Weibull distribution. Microelectronic. Reliability 19, pp 336-336.
- Lambooy, M.H. [1987] Het ontwerpen van onderhoudsconcepten bij DMV Campina BV Veghel. Afstudeerverslag, Technische Universiteit Eindhoven, afd. Bdk.
- Lambooy, M.H., Gits, C.W. [1987] Het ontwerpen van een onderhoudsconcept: een toepassing bij DMV Campina BV, Veghel. Onderhoudsmanagement, D9010, 1-22, Samson.
- Langrock, P., Jahn, W [1979] Einfhruung in die Theorie der Markovschen Ketten und ihre Anwendungen. Karl Marx Univeritat, Leipzig, Teubner Verlagsgesellschaft.
- Lawless, L.F. [1982] Statistical models and methods for lifetime data. John Wiley, New York.
- Lehman, R.S. [1977] Computer simulation and modelling. John Wiley, New York.
- Lewandowski, K. [1988] Key factors in improving maintenance skills. Euro-Mainten. '88, Finland, conf. book I, pp 32-45.
- Lewis, E.E. [1987] Introduction to reliability engineering. John Wiley, New York.

- Liang, T.Y. [1985] Optimum piggyback preventive maintenance policies. IEEE Trans. on Reliability 34, pp 529-538.
- Lilius, W.A. [1979] Graphical analysis of repairable systems. ARMS IEEE 79 ch1429-OR, pp 403-406.
- Lindley, D.V., Phillips, L.D. [1976] Inference for a bernoulli process (a Bayesian view). The Am. Statist. 30, nr. 3, pp 112-119.
- Linstone, Turoff [1975] The Delpi method. Addison Wesley Inc., U.S.
- Malmholt, O. [1988] Man in maintenance. Euro-Mainten. '88, Finland, conf. book I pp. 11-20.
- Mann, H.B. [1945] Nonparametric tests against trend. Econometrica 13, pp 245-259.
- Mann, N.R. Schafer, R.E., Singpurwalla, N.D. [1974] Methods for statistical analysis of reliability and life data. John Wiley, New York.
- Martz, H.F., Waller, R.A. [1982] Bayesian reliability analysis. John Wiley, New York.
- McCall, J.J. [1965] Maintenance policies for stochastically failing equipment; a survey, Management Science 11-5, pp 493-524.
- McConalogue, D.J. [1981] Numerical treatment of convolution integrals involving distributions with densities having singularities at the origin. Commun. in statistics, B10, pp 265-280.
- Methoden voor het bepalen en verwerken van kansen [1987] Commissie Preventie van Rampen door Gevaarlijke stoffen. Dir. Gen. van de Arbeid., Rap nr. CPR 12.
- MIL-HDBK-189 [1981] Reliability growth management. Hdq. U.S.Army Commun. Res. and Dev. Command, ATTN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ 07702.
- MIL-HDBK-217D [1982] Reliability prediction of electronic equipment. Commander Rome Air Dev. Center, ATTN: RBRT, Griffiss Air Force Base, New York 13441. Inmiddels verscheen versie E.
- MIL-STD-721C [1981] Definitions of terms for reliability and maintainability. Commanding Officer, Eng. Spec. and Standards Dep. Naval Air Eng.Center, Lakehurst NJ 08733.
- MIL-STD-757 [1964] Reliability evaluation from demonstration data. Dep. of Defence, Washington, D.C.
- MIL-STD-781C [1977] Reliability design qualification and production acceptance Tests: exponential distribution. Naval Electronic Systems Command, Washington, D.C. 20360.
- Mooren, A.L. van der [1986] Lijst van onderhoudstermen, concept. Ongepubliceerd. Technische Universiteit Eindhoven.
- Mooren, A.L. van der [1987] Terol: inleiding, Dictaat T.U.E, fac. W-WOP, nr 4-004651.
- Mooren, A.L. van der, Hankmann, W. [1985] Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt (1). De Constructeur no. 6, pp 30-37.
- Mooren, A.L. van der, Smith, P. [1982] Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten. De Constructeur nr 12, pp 22-28.
- Mooren, A.L. van der, Smith, P. [1983] Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (2). De Constructeur nr 2, pp 26-33.
- Mooren, A.L. van der, Smith, P., Hankmann, W. [1981] Onderhoudsbewust ontwerpen in de werktuigbouw. De Constructeur no. 9, pp 58-67.

- Naylor, J.C., Smith, A.F.M. [1982] Applications of a method for the efficient computation of posterior distributions. *Appl. Statistics* 31, pp 214-225.
- Nelson, W. [1969] Hazard plotting for incomplete failure data, *J. of Qual. Techn.* 1, pp 27-52.
- Nelson, W. [1982] *Applied life data analysis*. John Wiley, New York.
- Newell, A., Simon, H.A. [1972] *Human problem solving*, Engelwood Cliffs, N.J. Prentice Hall.
- Newman, T.G., Odell, P.L. [1971] *The generation of random variates*. Griffin, London, 1971.
- NIVE, 1987. *Onderhoudsmanagement. Handboek voor technische- en onderhoudsdiensten*. Samson, Alphen aan de Rijn.
- O'Conner, P.D.T. [1981] Practical reliability engineering. Heyden, Londen. Euro-Mainten. '88, Finland, conf. book II pp. 115-122.
- Pekkarinen, T. [1988] Cooperation between the paper mill and the paper machine supplier.
- Pierskalla, W.P., Volker, J.A. [1976] A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. *Nav. Res Logistics Quarterly* 23, pp 353-388.
- Popper, K. [1959] *The logic of scientific discovery*. Basis Books, New York.
- PRA Procedures Guide. [1983] Vol 1, U.S. Nuclear Regulatory Comm., NUREG/CR-2300
- Putten, C. van, Tweel, I. van der [1979] On generating random variables. Centrum voor wiskunde en informatica, Amsterdam.
- Radner, R, Jorgenson [1962] Maintenance policies for systems with several parts. Center for Research in Management Science, University of California, Berkeley, Techn. rep. no 8.
- Reitman, J. [1971] *Computer simulation applications: discrete event simulation for synthesis and analysis of complex Systems*. Wiley, Interscience
- Rijn, C.F.H. van [1987] A systems engineering approach to reliability, availability and mainten. conf. on Foundations of Computer Aided Operations, FOCAPO, Salt Lake City, U.S.
- Rohatgi, V.K. [1976] *An introduction to probability theory and mathematical statistics*. John Wiley, New York.
- Rubinstein, R.Y. [1981] *Simulation and the Monte Carlo method*. John Wiley, New York.
- Seim, G. [1968] Beiträge zur Theorie der inhomogenen Markovschen Ketten. Dissertatie, Technische Universität Braunschweig.
- Sherif, Y.S. [1982] Reliability analysis: optimal inspection and maintenance schedules of failing systems. *Microelectronics and Reliability* 22 pp 59-115.
- Sherwin, D.J. [1979] Inspection intervals for condition maintained items which fail in an obvious manner, *IEEE Trans. on Reliability* 28, pp 85-89.
- Singh, C., Billinton, R. [1974] A new method to determine the failure frequency of a complex system. *IEEE Trans. R-23*, pp 231-234.
- Singh, C., Billinton, R. [1975] Frequency and duration concepts in system reliability evaluation. *IEEE Trans. R-24* pp 31-36.
- Smith, A.F.M., Naylor, J.C. e.a. [1987] Progress with numerical and graphical methods for practical Bayesian statistics. *The Statistician* 36, pp 75-82.

- Smith, W.L. [1958] Renewal theory and its ramifications. *J. of Roy. Statist. Soc., series B*, 20-2, pp 243-302.
- Spoormaker, J.L. [1982] Ontwerpen op bedrijfszekerheid van mechanische systemen, *I² Wtb* 6, pp 25-31.
- Stephens, M.A., Agostino, R.B. [1986] *Goodness-of-fit techniques*. Dekker, New York.
- Stevens, B. [1986] *Guide to reliability data collection and management*. Eurodata, project report no. 3, Joint Research Center, Ispra.
- T.N.O rapport [1988] Kanscijfers ten behoeve van gebruik in betrouwbaarheidsstudies en risicoanalyses. Afd. Industriële veiligheid, TNO Apeldoorn.
- Thomas, L.C. [1982] A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 16, pp 297-309.
- Thompson, W.A. jr. [1981] On the foundations of reliability. *Technometrics* 23, pp 1-13.
- Thompson, W.A. jr. [1988] *Point process models with applications to safety and reliability*. Chapman and Hall, New York.
- Vergin, R.C., Scriabin, M. [1977] Maintenance scheduling for multi-component equipment. *AIEE Trans.* 9-3, pp 297-305.
- Vesely, W.E., Goldberg, F.F., Roberts, N.H., Haasl, D.F. [1981] *Fault tree handbook*. System and Reliability Research Office of NRC, U.S. Nuc. Regulatory Com., Washington, D.C.
- WASH-1400 Reactor Safety Study rapport [1974] An assessment of accidental risks in U.S. commercial nuclear power plants, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, D.C.
- Watanabe, Y. [1986] A Monte Carlo simulation method with a degraded state. Fusion Technology Institute. Rep. nr. UWFDM-644, Univ. of Wisconsin, Madison, W.I.
- Weibull, W. [1951] A statistical distribution function of wide applicability. *J. of appl. Mechanics* no 9, pp 293-297.
- Wijvekatte, M.L. [1986] *Verklarende statistiek*. Aula pocket 39, Het Spectrum, Utrecht.
- Yoshikawa, H. [1975] Fundamentals of mechanical reliability and its application to computer aided machine design. *Ann. of the CIRP*, vol 24, nr 1 pp 297-302.

CURRICULUM VITAE

Hendrik Both is geboren op 26 mei 1955 te Apeldoorn. Daar behaalde hij het HBS-B diploma. In de vroegste jeugdijaren is de basis gelegd voor een brede technische belangstelling. De afgeronde HTS-Wtb. opleiding getuigt daarvan. Daarna werd bij het Wapen der Genie de militaire diensplicht vervuld, als hersteller bouwmachines. De technische scholing is in 1985 afgerond met het ingenieursdiploma aan de Technische Hogeschool te Eindhoven, afdeling der werktuigbouwkunde.

Onderhoud blijkt steeds opnieuw een belangrijke rol te hebben gespeeld, zoals blijkt uit de keuze van de studie, de invulling van een stageplaats in het Verenigd Koninkrijk, de kaderopleiding in de militaire dienst en de laatste fase van de academische leerschool.

Tijdens het afstuderen is in de praktijk van de procesindustrie kennis gemaakt met de problematiek rond onderhoud en de optimalisatie daarvan. Deze ervaring heeft geleid tot de sollicitatie naar een promotieplaats en uiteindelijk tot het schrijven van deze dissertatie.

NAWOORD

De in deze dissertatie beschreven werkzaamheden konden niet anders dan in nauwe samenwerking met de industrie tot stand komen. Hiervoor ben ik in het bijzonder dank verschuldigd aan de Eindhovense vestiging van DAF Trucks en in verschillende opzichten aan DSM te Geleen. Dankzij de dikwijls vertrouwelijke informatie die deze bedrijven hebben verstrekt, kon aan dit werk de praktische dimensie gegeven worden, die ik als onderzoeker altijd voor ogen heb gehad.

STELLINGEN

behorende bij het proefschrift van

H. Both

Eindhoven, 23 mei 1989.

1. Het is zeer ongeloofwaardig indien, ter ondersteuning van het veelvuldig gebruik van de exponentiele verdeling voor de beschrijving van het faalgedrag van technische systemen, wordt beweerd dat dergelijke systemen meestal zo worden ontworpen en gebruikt dat voor hun onderdelen een toevallig faalpatroon te verwachten is.

(Green A.E. en Bourne, A.J. [1977] Reliability technology, John-Wiley, New York, pag 537.)

2. De veronderstelling dat de onderdelen van een goed ontworpen apparaat een onderling onafhankelijk faalgedrag vertonen, gaat volledig voorbij aan de afhankelijkheden die geïntroduceerd worden door het uitgevoerde onderhoud.

(Drenick, R.F. [1969] The failure law of complex equipment, J. Soc. Indust. Appl. Math., 8, 680-690)

3. Zolang bij de conditiebewaking van apparaten de meet- en diagnosefuncties geen integraal onderdeel van de onderhoudsorganisatie vormen, zullen de in het algemeen hooggespannen toekomstverwachtingen voor toestandsafhankelijk onderhoud niet worden bewaarheid.

4. Malik stelt dat er in geen enkel vakgebied een grotere kloof is tussen praktijk en theorie dan in het onderhoud. Deze situatie zal veranderen indien de onderwaardering van onderhoud als vakgebied in de academische wereld doorbroken wordt. De impulsen daartoe zullen mede vanuit de industrie moeten komen.

(Malik, M.A. [1979] Reliable preventive maintenance scheduling, AIEE Trans., 11, 221-226)

5. De wetenschappen die de mens-machine relatie tot hun aandachtsgebied rekenen, dienen hun vrijwel exclusieve belangstelling voor bedieningsvraagstukken uit te breiden tot het terrein van het onderhoud.
6. Het verder doordringen van de computer in de praktijk van het onderhoud kan op verschillende manieren bijdragen tot een positieve ontwikkeling en een opwaardering van dit vakgebied.
7. Het verdient ten zeerste aanbeveling een soevereine staat te stichten met als grondgebied de bodem van de nu nog internationale wateren.
8. Het is de hoogste tijd het gezegde "verbeter de wereld, begin bij jezelf" te veranderen in "behoud de wereld, verbeter jezelf".
9. De mogelijkheid tot grondbezit voor industriële ondernemingen zou moeten worden afgeschaft en omgezet in bruikleen tegen borgstelling.
10. Het is opvoedkundig gezien in meerdere opzichten gewenst dat voor kinderspeelgoed niet alleen veiligheidseisen, maar ook voorschriften voor de repareerbaarheid worden geformuleerd.
11. Het steeds minder terughoudend toegeven aan de vervulling van individuele, materiële wensen, leidt tot afglijden naar een onmenselijker maatschappij, waarin eenzaamheid zal uitgroeien tot de belangrijkste volksvijand.