

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a)

Citation for published version (APA):

Mooren, van der, A. L., & Smith, P. (1984). Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a). *Constructeur*, 23(6), 38-45.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1984

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.

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a)

In deel (1)* is aangegeven dat de standtijd en de onderhoudstijd van een technisch systeem als stochastische grootheden moeten worden opgevat, te beschrijven door kansverdelingen. In deel (2) is nader ingegaan op de aard van de grootheden en van de functies om deze beide aspecten van het onderhoudsgedrag te karakteriseren; in het bijzonder kwam het faalgedrag van werktuigkundige componenten aan de orde. In deel (3) zijn methoden besproken om een verband te leggen tussen het faal- en herstelgedrag van werktuigkundige componenten en het onderhoudsgedrag van een daaruit samengesteld object; daarbij is rekening gehouden met het toegepaste onderhoudsconcept en met de faalstructuur van het systeem.

De laatste twee delen zijn gewijd aan toepassing van de verworven inzichten in de praktijk. In dit deel wordt behandeld hoe de benodigde gegevens aangaande het faal- en herstelgedrag kunnen worden verkregen uit de literatuur, databanken en/of eigen waarnemingen. Tenslotte zal in deel (5) het rekenprogramma 'Mainsithe' worden besproken met zijn toepassingsmogelijkheden en met vermelding van een aantal resultaten die ermee zijn verkregen.

Schatting van het faal- en herstelgedrag van componenten

Voorwaarden

Wat het faalgedrag van componenten betreft is eerder vermeld dat dit in beginsel kan worden afgeleid uit de belasting, de geometrie en de materiaaleigenschappen van enkeldelen, maar dat vooralsnog een andere weg beter begaanbaar lijkt, namelijk die van de bedrijfszekerheidsanalyse. Daarbij baseert men zich op empirisch bepaalde standtijden van soortgelijke componenten die onder overeenkomstige omstandigheden functioneren, in het laboratorium of in de praktijk. Wat het herstelgedrag van componenten betreft staat een analoge weg open, die met onderhoudsbaarheidsanalyse kan worden aangeduid. Bij dergelijke analyses wordt een aantal componenten, een steekproef, gekozen uit een grotere verzameling exemplaren, de populatie, en beproefd op hun faal- cq herstelgedrag. De populatie kan zowel bestaan uit een stationaire partij (bij voorbeeld een voorraad componenten in een magazijn), als uit de uitkomsten gedurende een zekere periode van een proces (bij voorbeeld de waargenomen standtijden van componenten gedurende één jaar). Tussen de eigenschappen van de steekproef en van de populatie als geheel kan een verband worden gelegd met behulp van de mathematische statistiek. Daarmee kan men onder andere de kans aangeven dat een steekproef, genomen uit een populatie van bekende samenstelling, bepaalde eigenschappen bezit. Omgekeerd kan men op grond van waargenomen eigenschappen van steekproeven aangeven wat de te verwachten eigenschappen van de betreffende populatie zijn. Bovendien kan men de betrouwbaarheid van dergelijke uitspraken bepalen, bij voorbeeld de grenzen waarbinnen de werkelijke waarde met een waarschijnlijkheid van 95% ligt.

De te onderzoeken populatie kan bestaan uit een verzameling materiële componenten, bij voorbeeld een aangekochte partij van honderd walsrollen voor gebruik in een batterij van twintig veevoederpersen. De te meten eigenschap kan de hardheid van hun mantel zijn. Om die te kunnen beoordelen kan men bij voorbeeld twintig rollen uitkiezen voor onderzoek in het laboratorium. De uitkomst van deze steekproef geeft informatie over de gemiddelde hardheid van de rollen en de spreiding rond deze waarde in de partij. Een andere eigenschap die ons kan interesseren, is het faalgedrag van de rollen, in het bijzonder hun standtijd. Om die vast te stellen, kan men één van de persen van de batterij nemen en er bij voorbeeld twintig rollen achtereenvolgens op testen door vast te leggen wanneer zij zijn gemonteerd en hoe lang hun bedrijfstijd is op het moment van falen. Zin en doel van een dergelijk experiment zal in het algemeen zijn dat men de resultaten wil extrapoleren en wel:

- naar het faalgedrag van de rollen bij gebruik op andere persen van de batterij
- naar het faalgedrag van de rollen na afloop van de beproevingsperiode, dus in de toekomst.

De onderzochte rollen vormen aldus een steekproef op grond waarvan men een grotere populatie wil beoordelen. Wat het faalgedrag van de rollen op andere persen van de batterij betreft, is het de vraag of de bedrijfsomstandigheden voor de verschillende persen wel dezelfde zijn; slechts in dat geval valt te verwachten dat de standtijden van de rollen op elke pers gelijke verdelingen hebben. Aan deze voorwaarden kan bij voorbeeld niet zijn voldaan indien sommige persen meer verontreinigingen in het product te verwerken krijgen dan andere. Ook moeten de bedrijfsomstandigheden stationair blijven; aan deze voorwaarde kan bij voorbeeld niet zijn voldaan indien mettertijd de samenstelling van de verwerkte grondstoffen wijzigt.

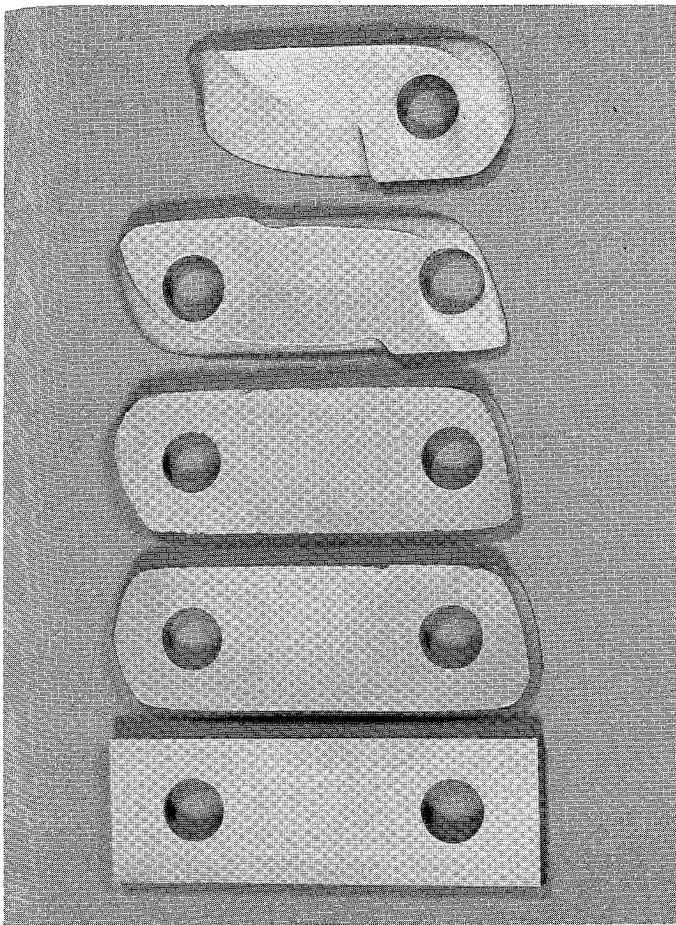
Het spreekt vanzelf dat een steekproef slechts tot betrouwbare schattingen kan leiden indien hij voldoende representatief is, dat wil zeggen indien hij de werkelijke samenstelling van de populatie waaruit hij is genomen, voldoende nauwkeurig weergeeft. Om geen systematisch vertekend beeld te geven, moeten alle exemplaren die tot de te beoordelen populatie behoren, eenzelfde kans hebben om in de steekproef te belanden, met andere woorden de steekproef moet aselekt worden getrokken. Een goede beoordeling van het faalgedrag van de populatie persrollen is dus niet mogelijk indien men wel defecte exemplaren, maar niet preventief vervangen rollen in de steekproef opneemt; de gehanteerde vervangingsprocedure beïnvloedt dan de waarnemingen. Om de kans voldoende klein te maken dat men toevallig een sterk eenzijdig samengestelde steekproef trekt, bij voorbeeld uitsluitend elementen met een relatief korte standtijd, moet bovendien de omvang van de steekproef voldoende groot zijn.

Metingen

Behalve door de proefopzet, dat wil zeggen door de omvang van de steekproef en door de wijze waarop men de elementen kiest uit de populatie, wordt de nauwkeurigheid waarmee het waarnemingsre-

* De delen 1, 2 en 3 zijn verschenen in 'De Constructeur' van 1982 nr. 12, p. 22-28; 1983 nr. 2, p. 26-33 en nr. 8, p. 36-45

** sinds 1 januari 1984 werkzaam bij Océ van der Grinten te Venlo



Figuur 39
Opeenvolgende stadia van slijtage van de hamers van een hamermolen

sultaat de (onbekende) werkelijkheid beschrijft ook bepaald door de wijze waarop de eigenlijke metingen plaatsvinden en de manier waarop de resultaten worden verwerkt en weergegeven. Een goede meting vereist in de eerste plaats een duidelijk gedefinieerde te meten grootte en bijbehorende meeteenheid; voorts uiteraard nauwkeurig meetgereedschap. Dit kan vrij eenvoudig zijn, bij voorbeeld in het geval dat men de hardheid van persrollen wil bepalen, hetgeen kan gebeuren met een hardheidsmeter volgens een gestandaardiseerde procedure. Maar het bepalen van faaleigenschappen kan problemen opleveren omdat daarbij uiteraard de vraag een rol speelt op welk tijdstip een component faalt. Het bepalen van de faalvormen en faalgrenzen kan simpel zijn, bij voorbeeld bij breuk, maar ook moeilijk omdat men die arbitrair moet kiezen als de over-, cq onderschrijding van een bepaalde waarde op een continue schaal. In figuur 39 zijn als voorbeeld de hamers van een hamermolen afgebeeld in originele, gesleten en ver afgesleten staat; waar legt men nu de faalgrens?

Uitvoeringsproblemen

Bij het vaststellen van het faalgedrag van componenten in bestaande objecten moet dus aan een aantal stringente voorwaarden zijn voldaan wil men tot een betrouwbaar resultaat kunnen komen. Vereist is dat de waarnemingen zijn ontleend aan een stationair proces (hetgeen onder andere constante bedrijfsomstandigheden eist), dat de steekproef representatief is (waartoe onder andere aselechte trekking van genoeg exemplaren noodzakelijk is) en dat nauwkeurig wordt gemeten (hetgeen onder andere een goed gedefinieerde meetgrootte en een goede weergave van de uitkomsten vergt).

In de praktijk is het vaak moeilijk in voldoende mate aan deze eisen te voldoen. Dit geldt in de eerste plaats voor de bedrijfsomstandigheden; deze moeten vooraf goed worden gedefinieerd en vervolgens worden gehandhaafd. In een laboratoriumsituatie kan

dat al lastig zijn omdat men in feite niet alle relevante invloeden en hun samenhang kent. In een bedrijfssituatie is het nagenoeg onmogelijk, zodat daar grotere variaties in de bedrijfszekerheids-cijfers onvermijdelijk zijn. Maar het onderhoudsaspect verdient eveneens bijzondere aandacht; indien de componenten tijdens hun standtijd preventieve onderhoudsacties ondergaan, moet ook de daarbij gevolgde procedure nauwkeurig worden gedefinieerd en aangehouden.

Het verzamelen van voldoende waarnemingen kan tijdrovend en duur zijn. Vaak streeft men immers naar lange standtijden, zodat grote steekproeven een lange beproevingsperiode en/of een groot aantal identieke proefopstellingen vereisen. Een bijzonder probleem is het verzamelen van voldoende gegevens over het faalgedrag van veiligheidsvoorzieningen, zoals remmen, drukveiligheden en dergelijke; omdat falen uit veiligheidsoogpunt ontoelaatbaar is, wordt in het bedrijf juist getracht dit te voorkomen door de keuze van de onderhoudspolitik.

Wat de weergave van de meetresultaten aangaat, beperkt men zich vaak tot het vermelden van de verwachtingswaarde van de betreffende verdeling, de gemiddelde standtijd cq de MTBF-waarde, of tot de reciproke waarde van deze grootte, die dan als 'het' faalt tempo wordt opgegeven, zonder dat vaststaat of zelfs maar aannemelijk wordt gemaakt dat dit in de tijd gezien constant is. De verklaring daarvan kan zijn dat men wel beschikt over het aantal componenten dat in een bepaalde periode heeft gefaald, maar niet hun individuele standtijd heeft vastgelegd. Een aldus 'vereenvoudigd' resultaat kan echter misleidend zijn, want het betreft dan in feite de gemiddelde waarde over die periode van de gewoonlijk tijdsafhankelijke faalfrequentie $h(t)$, deel (3).

Onze bedoeling is om gegevens over het faalgedrag van componenten, zoals dat zich manifesteert bij in bedrijf zijnde objecten, te gebruiken om bij het ontwerpen het te verwachten faalgedrag van nieuwe objecten te kunnen schatten. Dit is alleen goed mogelijk indien mag worden verwacht dat de eigenschappen in kwestie in de beschouwde populaties (vrijwel) dezelfde kansverdeling hebben. Om te kunnen nagaan in hoeverre bij het ontwerpen toepassen van faalgegevens, eventueel in aangepaste vorm, aanvaardbaar is, moet de ontwerper tenminste inzicht hebben in de aard van de populatie waaruit de gegevens stammen. Om bovendien te kunnen beoordelen wat de gegevens op zichzelf genomen waard zijn, moet hij liefst ook op de hoogte zijn van de wijze waarop de steekproef is getrokken en eveneens van de manier waarop de meetresultaten zijn verwerkt. Daartoe moeten populatie, trekkingsprocedure en meetprocedure in operationele termen zijn gedefinieerd, bij voorbeeld als volgt:

- populatie
 - componenten: begrenzing van de beschouwde populatie. Constructie (type, uitvoering, afmetingen; merk en fabrikant; productiejaar en -wijze). Voorgeschiedenis (transportwijze; wijze en duur van opslag) etcetera
 - gebruiksomstandigheden: in welk object gebruikt, voor welk doel, met welke belastingen, in welke omgeving
 - onderhoudsconcept: aard en frequentie van preventieve acties, alsmede geheel of gedeeltelijk herstel etcetera
 - faalgedragsproces: is te verwachten dat dit stationair is? Zijn aanloop- cq verouderingsinvloeden geëlimineerd, evenals de mogelijke gevolgen van tussentijdse constructiewijzigingen
- steekproef
 - trekkingsprocedure: is de steekproef aselekt genomen? Hoe groot is het aantal verwerkte waarnemingen
- meting
 - faalcriterium: welke faalvormen zijn in beschouwing genomen? Hoe luiden de gehanteerde faalgrenzen? Wat zijn de faaltijdstippen van alle componenten die falen? Wat is hun faalvorm en de faaloorzaak (ontwerp, fabricage, bediening, onderhoud, normale slijtage en dergelijke). Wat is de gebruikstijd van de nog niet gefaalde componenten

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a)

- faalgedragskenmerk: hoe gedefinieerd? Is eventueel geverifieerd of het faaltempo constant is? Wat is het betrouwbaarheidsinterval?

In de praktijk zal een dergelijk uitgebreid inzicht ten aanzien van de beschikbare gegevens zelden aanwezig zijn. Zo niet, dan hoeft men nog niet geheel af te zien van het gebruik van die informatie, maar men moet er op zijn minst (zeer) kritisch tegenover staan.

Gegevensbestanden

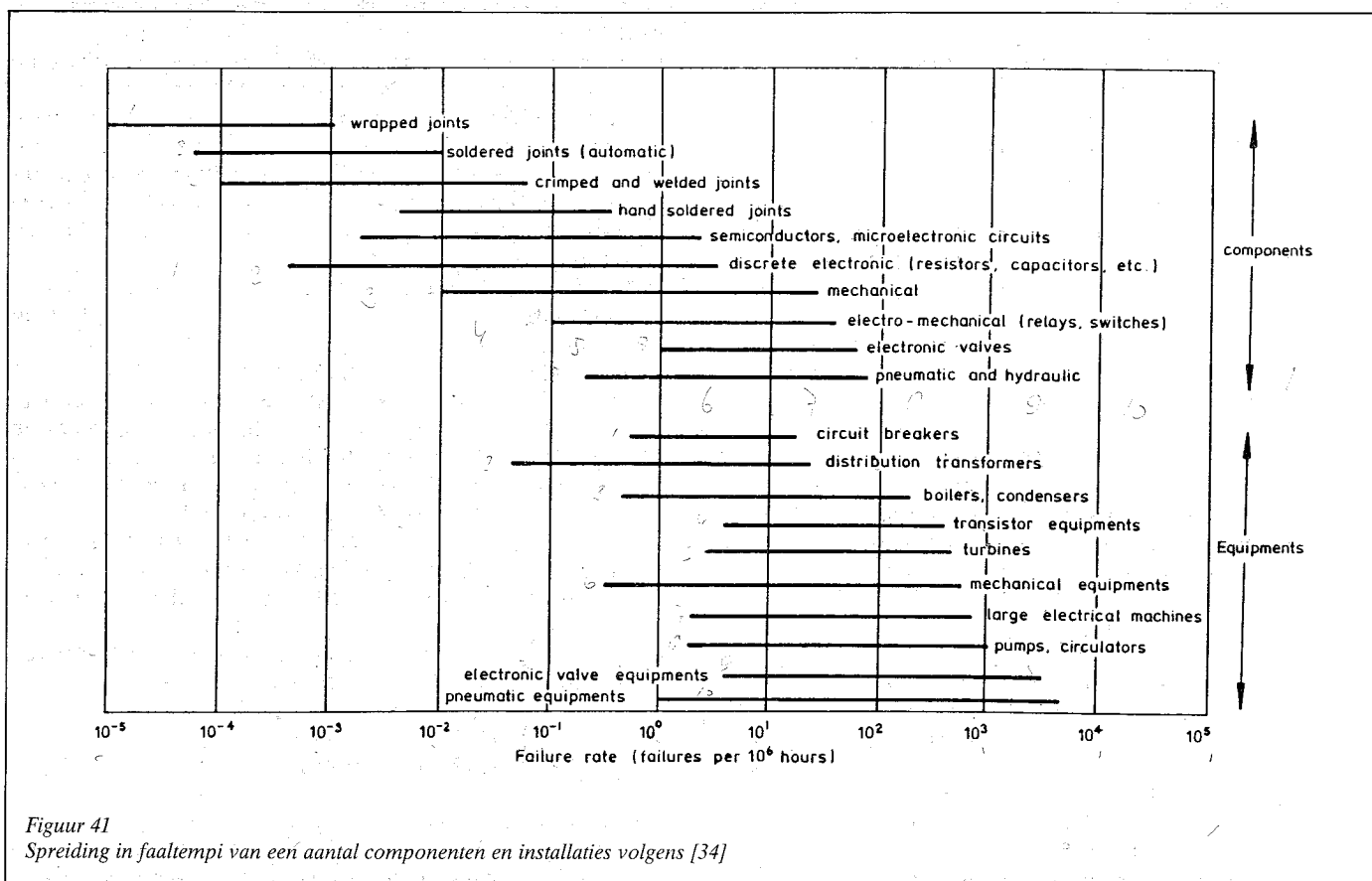
Literatuur

Indien men weinig ervaring heeft met een bepaalde soort componenten en/of onvoldoende kennis bezit van hun faalgedrag onder afwijkende omstandigheden, kan men overwegen deze gegevens te verkrijgen door middel van waarnemingen, in de praktijk of in het laboratorium. Het kan echter bij voorbaat duidelijk zijn dat het opzetten en uitvoeren van een dergelijke operatie ad hoc te lang duurt om er de vruchten van te kunnen plukken. Bovendien kunnen de kosten een bezwaar vormen. In dergelijke gevallen ligt het voor de hand te trachten gebruik te maken van algemeen

Type of component	Failure-rate /10 ⁶ h
Ball bearings, heavy duty	20.0
Ball bearings, light duty	10.0
Roller bearings	5.0
Sleeve bearings	5.0
Shafts, heavily stressed	0.2
lightly stressed	0.02
Pins	15.0
Pivots	1.0
Couplings	5.0
Belt drives	40.0
Spur gears	10.0
Helical gears	1.0
Friction clutches	3.0
Magnetic clutches	6.0
Springs, heavily stressed	1.0
lightly stressed	0.2
Hair springs	1.0
Calibration springs, creep	2.0
breakage	0.2
Vibration mounts	9.0
Mechanical joints	0.2
Grub screws	0.5
Nuts	0.02
Bolts	0.02
Rack-and-pinion assemblies	2.0
Knife-edge fulcrums, wear	10.0

Figuur 40
Gemiddelde faaltempi van een aantal werktuigkundige componenten volgens [33]

toegankelijke gegevens uit de literatuur of uit commerciële bedrijfszekerheids-databanken. Een typisch voorbeeld van bedrijfszekerheidsgegevens van werk-



Figuur 41
Spreiding in faaltempi van een aantal componenten en installaties volgens [34]

tuigkundige componenten, zoals die in de literatuur zijn te vinden, geeft figuur 40, die betrekking heeft op mechanische componenten [33]. Zoals vaak het geval is, wordt het 'constante' faalt tempo opgegeven, en wel in een aantal gevallen van falen per miljoen uur. Merk op dat slechts in enkele gevallen een indicatie wordt gegeven van de aard van de constructie, van de gebruiksomstandigheden en van de faalvorm. De cijfers worden uitdrukkelijk als gemiddelde waarden gepresenteerd; omtrent de spreiding rond deze waarden blijft de lezer in het ongewisse.

Na hetgeen in het voorgaande is gezegd over de termen waarin gegevens moeten worden geformuleerd om hun bruikbaarheid voor een specifieke ontwerptoepassing te kunnen beoordelen, zal het duidelijk zijn dat juist hier het zwakke punt ligt bij het toepassen van cijfers uit de literatuur. De beschrijving van de populatie(s) waaraan de gegevens zijn ontleend, van de wijze waarop de steekproef is getrokken en van de manier waarop de meting is uitgevoerd ontbreekt geheel of is tenminste uiterst vaag. Aangezien wijzigingen in elk van deze factoren het resultaat van de waarnemingen (sterk) kunnen beïnvloeden, kunnen de verstrekte cijfers niet anders dan zeer globaal zijn. Indien de opgave realistisch is, moet dit ook blijken uit een relatief grote spreiding in de vermelde waarden. Dit toont bij voorbeeld figuur 41 waarin de faaltempi voor eenzelfde klasse van componenten tenminste een factor 100 en soms zelfs een factor 10 000 uiteenlopen [34]. Het is duidelijk dat de bruikbaarheid van dergelijke cijfers uit de literatuur uiterst gering is.

Commerciële databanken

Voor gestandaardiseerde, universeel toepasbare componenten lijkt het aantrekkelijk de bedrijfszekerheidsgegevens te ontleen aan een algemeen toegankelijke databank, een bestand van faalgegevens dat op korte termijn geraadpleegd kan worden, zij het tegen betaling. De laatste jaren wordt, in het kader van de belangstelling voor bedrijfszekerheidsvragen, veel aandacht besteed aan deze mogelijkheid. De achterliggende gedachte is, dat een dergelijke geconcentreerde compilatie van gegevens in principe tot resultaten moet kunnen leiden die nauwkeuriger zijn en/of goedkoper worden verkregen. Inmiddels is een aantal dergelijke, branche-gewijze opgezette databanken operationeel.

Een overzicht van de belangrijkste databanken is te vinden in [35]. Bekend is vooral de SRS-databank (Systems Reliability Service), een activiteit van de United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), het lichaam dat onder andere de engelse kerncentrales exploiteert. Een voorbeeld van de informatie die deze databank kan verschaffen, toont figuur 42 [36]. Hieruit blijkt dat de gegevens meer specifiek zijn dan die uit de literatuur wat betreft de aard van de component, de bedrijfsomstandigheden en de omvang van de steekproef. Toch blijven vragen open, zoals ten aanzien van het toegepaste onderhoudsconcept.

Wil men gegevens verzamelen voor opslag in een databank, dan moet men rekening houden met de reeds geformuleerde algemene voorwaarden. Deze zijn gepreciseerd in nadere richtlijnen waaraan men moet voldoen om tot bedrijfszekerheidskarakteristieken van hoge kwaliteit te komen, bij voorbeeld [37]. In de praktijk blijkt echter dat ook de gegevens in databanken niet altijd volgens dergelijke richtlijnen (kunnen) worden verzameld, onder andere om economische redenen, zodat ook deze informatie een beperkte waarde heeft.

Bedrijfsarchieven

Reeds werd opgemerkt dat het ad hoc verzamelen van faalgegevens van componenten ten behoeve van een nieuw ontwerp te lang kan duren om er tijdig van te kunnen profiteren en bovendien qua kosten te zwaar op het betreffende project kan drukken. Voorts bleek dat gegevens uit de literatuur en uit commerciële databanken weliswaar snel te krijgen zijn, maar dat hun gebruikswaarde meestal (zeer) twijfelachtig is. Deze bezwaren kunnen verregaand worden ondervangen indien men er in slaagt mettertijd een eigen

1 Boiler Feed Pumps		
Manufacturer	A	B
Size	7000 HP	6000 HP
Operating pressure	2500 psig	2500 psig
Population	6	10
History time	3 1/2 years	5 1/2 years
Failure rate	6 faults pump/year	4 faults pump year
2 Industrial Gas Turbine		
Application	Average industrial	
Range, size power	6400 HP	
Information type	Field, correctly reported	
Data year	1970	
Failure rate of fuel control unit of the gas turbine		
No of items	3	
Items x operating time	20 item years	
No of faults	2	
Failure rate (mean)		
(Based on operating time)	11.4 faults 10 ⁶ hrs	
(lower limit)	1.38 faults 10 ⁶ hrs	
(upper limit)	41.2 faults 10 ⁶ hrs	
Confidence band	95%	

Figuur 42

Voorbeelden van faalgegevens uit de SRS-databank [36]

bedrijfszekerheidsarchief op te bouwen uit waarnemingen, die zonder veel extra kosten aan het normale bedrijfsgebeuren kunnen worden ontleend. Te denken valt in een productiebedrijf bij voorbeeld aan gegevens die toch al door de eigen onderhoudsdienst worden genoteerd, bij voorbeeld op machinekaarten, of die reeds in de magazijnadministratie worden vastgelegd. De compilatie kan ook uitstekend worden ingepast in het programma van een computergesteund onderhoudsbesturingssysteem, zoals dat door verschillende bedrijven zelf is ontwikkeld en inmiddels ook door gespecialiseerde firma's wordt aangeboden. Overeenkomstige mogelijkheden bestaan in het geval van een bedrijf, dat producten aan derden levert en deze gedurende kortere of langere tijd met een eigen service-dienst onderhoudt, zoals bij transportmiddelen en gebruiksgoederen vaak het geval is. De voordelen van deze weg om faalgegevens van componenten te vergaren zijn duidelijk:

- de aard van de componenten (type, uitvoering, afmeting etcetera) staat exact vast
- de gegevens ontstaan onder omstandigheden die goed bekend zijn
- het toegepaste onderhoudsconcept, waaronder de toegepaste onderhoudspolitiek en het beoogde faalcriterium, zijn bekend
- de wijze waarop de steekproef is genomen, de metingen zijn verricht en de uitkomsten zijn verwerkt, is goed gedefinieerd; de nagestreefde nauwkeurigheid van het resultaat kan men aanpassen aan zijn eigen behoefte
- de kosten belopen in feite slechts de, doorgaans geringe, additionele administratiekosten, want speciale experimenten kunnen achterwege blijven.

Voor zover er achteraf onduidelijkheden ten aanzien van deze factoren aan het licht komen, is opheldering meestal eenvoudig te verkrijgen. Indien naderhand aanvullende gegevens nodig blijken die niet werden vastgelegd, kunnen deze vaak nog worden achterhaald, zij het tegen extra kosten. Langs deze weg is het dus gewoonlijk mogelijk gegevens te verzamelen die goed zijn afgestemd op de eigen behoefte. Uiteraard vergt het opbouwen van een dergelijk archief een voldoende aantal in bedrijf zijnde, gelijksoortige objecten om waarnemingen aan te ontleen en bovendien de middelen om de operatie te continueren. In het algemeen zullen slechts grotere bedrijven daartoe in de gelegenheid zijn.

Puntschattingen van faalgedragskenmerken

Grote steekproeven

Neem aan dat een steekproef van n componenten is getrokken uit een grote populatie teneinde het faalgedrag van de populatie als

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a)

geheel te bepalen. De componenten in de steekproef worden beproefd onder relevante omstandigheden; dit kan zijn door belasting tijdens bedrijf, of onder overeenkomstige condities in het laboratorium. De standtijden $\tau_1 \dots \tau_i \dots \tau_n$ worden genoteerd. Uit deze waarnemingen kan de waarde worden afgeleid van een aantal faalgedragsgrootheden van de componenten in de steekproef. Deze gemeten waarden kunnen worden gebruikt als schatters van de (onbekende) werkelijke waarden die deze grootheden bezitten in de populatie. Wij gebruiken voor de schatter van een grootheid hetzelfde symbool als voor de geschatte grootheid zelf, echter voorzien van een 'dakje'; $\hat{R}(t)$ bij voorbeeld geeft de geschatte waarde aan van de bedrijfszekerheid $R(t)$. De te volgen procedure wordt thans beschreven voor het geval dat het een grote steekproef betreft, waaronder valt te verstaan dat het aantal exemplaren n in de steekproef circa 30 of meer bedraagt.

Faalkans en bedrijfszekerheid

In deel (2) is de faalkans van een systeem op tijdstip t_1 gedefinieerd als:

$$F(t_1) = P(0 \leq \tau \leq t_1)$$

Indien de steekproef n componenten omvat en het aantal gefaalde exemplaren op het tijdstip t_1 bedraagt $\nu(t_1)$, kan als schatter $\hat{F}(t_1)$ voor de faalkans $F(t_1)$ worden genomen:

$$\hat{F}(t_1) = \frac{\nu(t_1)}{n}$$

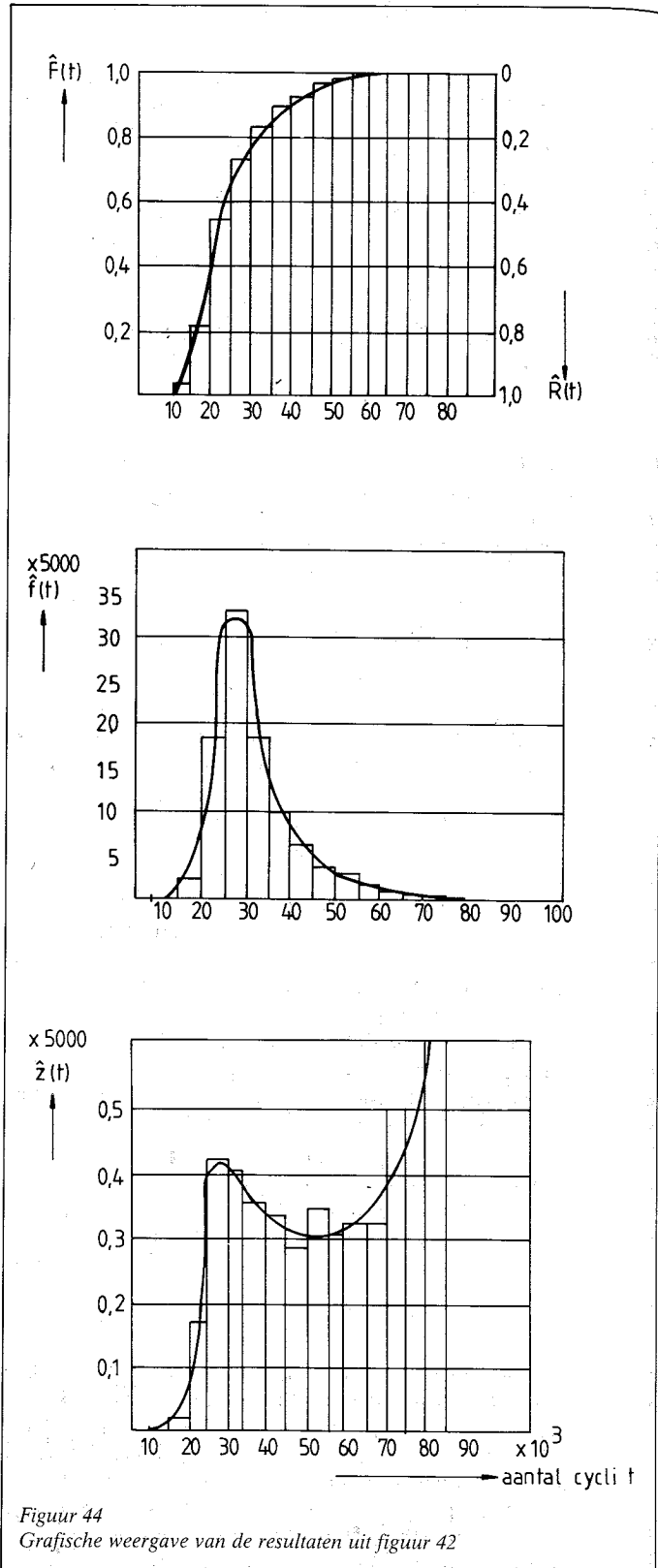
Evenzo kan als schatter $\hat{R}(t_1)$ voor de bedrijfszekerheid $R(t_1)$ worden gekozen:

$$\hat{R}(t_1) = 1 - \hat{F}(t_1) = \frac{n - \nu(t_1)}{n}$$

Voorbeeld [38]

Er worden 235 proefstukjes uit Fe 360 aan een vermoeiingsproef

onderworpen door het aanbrengen van een sprongbelasting met een constante spanningsamplitude van 320 N/mm^2 . De standtijden lopen uiteen van 15 000 tot 85 000 cycli. Het is gebruikelijk dergelijke grote aantallen waarnemingsresultaten weer te geven door het formeren van een beperkt aantal klassen ter breedte Δt ; dit levert een meer overzichtelijke presentatie op en spaart rekenwerk bij de verwerking. Zowel te kleine als te grote waarden van Δt voeren tot slecht bruikbare resultaten; in het eerste geval treden grote toevallige afwijkingen op zonder reële betekenis, in het tweede geval worden significante verschillen weggemiddeld. Volgens een vuistregel kiest men het aantal klassen doelmatig onge-



Figuur 44
Grafische weergave van de resultaten uit figuur 42

Figuur 43

Beproeving op vermoeiing van 235 proefstukjes uit Fe 360

klasse [x 1000 cycli (1)	aantal defect (2)	cumulatief aantal defect (3)	aantal overlevenden aan begin (4)	$\hat{F}(t)$ (5)	$\hat{R}(t)$ (6)	$\hat{f}(t)$ x 5000 (7)	$\hat{z}(t)$ x 5000 (8)
15+20	5	5	235	0,021	0,979	0,021	0,021
20+25	43	48	230	0,204	0,796	0,183	0,187
25+30	78	126	187	0,536	0,464	0,332	0,417
30+35	44	170	109	0,723	0,277	0,187	0,404
35+40	23	193	65	0,821	0,179	0,097	0,354
40+45	14	207	42	0,881	0,119	0,059	0,333
45+50	8	215	28	0,915	0,085	0,034	0,286
50+55	7	222	20	0,945	0,055	0,030	0,350
55+60	4	236	13	0,996	0,038	0,017	0,308
60+65	3	239	9	0,974	0,026	0,013	0,333
65+70	2	231	6	0,983	0,017	0,008	0,333
70+75	2	233	4	0,991	0,009	0,008	0,500
75+80	1	234	2	0,996	0,004	0,004	0,500
80+85	1	235	1	1	0	0,004	1
Σ235							

veer even groot als de wortel uit het aantal waarnemingen; in dit geval leidt dit tot $\sqrt{235} \approx 15$ klassen. Om een goed hanteerbare klassebreedte van 5000 cycli te verkrijgen, kiezen wij voor 14 klassen (figuur 43). In deze figuur zijn in kolom 1 de klassegrenzen vermeld en in kolom 2 het aantal defecte componenten per klasse. In kolom 3 is het aantal defecte componenten cumulatief genomen; betrokken op het totaal aantal componenten (235) levert dit de in kolom 5 vermelde schatter $\hat{F}(t)$ van de faalkans op. Kolom 6 vermeldt waarden voor $\hat{R}(t)$. Hieruit blijkt bij voorbeeld:

$$\hat{F}(25000) = \frac{48}{235} = 0,204$$

$$\hat{R}(25000) = \frac{235 - 48}{235} = 0,796$$

De aldus gevonden waarden kunnen in een grafiek worden uitgezet (figuur 44a).

Faalkansdichtheid en faalt tempo

In deel (2) is de faalkansdichtheid van een systeem op tijdstip t_1 gedefinieerd als:

$$f(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t_1 + \Delta t) - F(t_1)}{\Delta t}$$

Indien de steekproef n componenten omvat en het aantal defecte exemplaren op het tijdstip t_1 bedraagt $\nu(t_1)$, kan als schatter $\hat{f}(t_1, t_1 + \Delta t)$ voor de gemiddelde faalkansdichtheid in het traject $(t_1, t_1 + \Delta t)$ worden genomen:

$$\hat{f}(t_1, t_1 + \Delta t) = \frac{\nu(t_1 + \Delta t) - \nu(t_1)}{n \cdot \Delta t}$$

Evenzo kan als schatter $\hat{z}(t_1, t_1 + \Delta t)$ van het gemiddelde faalt tempo in het traject $(t_1, t_1 + \Delta t)$ worden gekozen:

$$\hat{z}(t_1, t_1 + \Delta t) = \frac{\hat{f}(t_1, t_1 + \Delta t)}{\hat{R}(t_1)} = \frac{\nu(t_1 + \Delta t) - \nu(t_1)}{\{n - \nu(t_1)\} \Delta t}$$

Voorbeeld (vervolg)

In figuur 43 zijn waarden voor $\hat{f}(t)$ vermeld in kolom 7; deze zijn verkregen door de waarden in kolom 2 te delen door het totale aantal componenten (235). Kolom 8 vermeldt waarden voor $\hat{z}(t)$; deze zijn berekend door de waarden in kolom 2 te delen door het aantal nog bedrijfsgerede componenten aan het begin van elke klasse, zoals vermeld in kolom 4. Hieruit blijkt bij voorbeeld:

$$\hat{f}(20.000, 25.000) = \frac{43}{235 \times 5000} = 0,183/5000$$

$$\hat{z}(20.000, 25.000) = \frac{43}{230 \times 5000} = 0,187/5000$$

De aldus gevonden waarden kunnen in een grafiek worden uitgezet, zie voor $f(t)$ en $\hat{z}(t)$ respectievelijk figuur 44b en c.

Kleine steekproeven

De beschreven schattingsmethode levert voor alle tijdsduren onder de kortste standtijd die in de steekproef optreedt, de faalkans 0 op. Evenzo bedraagt de faalkans 1 voor alle tijdsduren boven de langste standtijd die in de steekproef voorkomt. Aange-

volgorde van falen (1)	standtijd (2)	geschatte faalkans $\hat{F}(t)$ (3)
1	36	0,33
2	64	0,67
3	124	1

Figuur 45
Waargenomen standtijden bij één steekproef uit drie elementen

zien de waargenomen waarden slechts een steekproef vormen uit een grotere populatie, is het niet waarschijnlijk dat binnen die populatie in het geheel geen standtijden voorkomen die de waargenomen uiterste waarden onder-, respectievelijk overschrijden. Met andere woorden: de methode levert een systematische vertekening op door de faalkans bij lage waarden van t te onderschatten en bij hoge waarden van t te overschatten. Voor de bedrijfszekerheid geldt uiteraard het omgekeerde.

Bij grote steekproeven ($n \geq$ circa 30) is deze vertekening in het algemeen niet storend, bij kleine steekproeven echter wel. Dit kan worden geïllustreerd met een extreem voorbeeld dat is verkregen door trekkingen te doen uit een Weibull-verdeling ($\beta = 2, \gamma = 0$ en $\eta = 100$) met behulp van het nog te bespreken simulatieprogramma 'Mainsithe'. Een eerste steekproef, bestaande uit drie waarnemingen, leverde in volgorde van falen de standtijden $\tau = 36, 64$ en 124 op, zoals vermeld in figuur 45, kolom 2. Toepassing van de beschreven methode voor grote steekproeven leidt tot de in kolom 3 vermelde faalkansen, dus onder andere tot de conclusie $\hat{F}(124) = 1$. Het is echter niet aannemelijk dat alle elementen uit de populatie tussen de tijdstippen 36 en 124 falen. Dit blijkt in dit geval dan ook als we de waarnemingen voortzetten door een groot aantal steekproeven van elk drie stuks te trekken. In figuur 46 zijn eveneens de uitkomsten van de steekproeven 2 tot en met 10 vermeld en daarbij blijken al standtijden < 36 en > 124 voor te komen.

volgorde van falen	nummer van de steekproef									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	36	41	19	67	63	42	54	41	67	49
2	64	48	46	124	74	81	76	64	101	57
3	124	70	162	138	104	94	244	112	118	62

Figuur 46
Waargenomen standtijden in een reeks steekproeven uit elk drie elementen

De waarnemingen in de verschillende steekproeven ten aanzien van het eerste faaltijdstip spreiden rond een centrale waarde, die wij μ_1 noemen. Evenzo spreiden de tijdstippen waarop de tweede en de derde component uit de steekproeven falen, rond centrale waarden, respectievelijk μ_2 en μ_3 , (figuur 47). Onder de gegeven omstandigheden is het zinvol het derde faaltijdstip τ_3 in een willekeurige steekproef van drie stuks te beschouwen als een schatting van de centrale waarde μ_3 en er als faalkans $\hat{F}(\tau_3)$ niet de waarde 1 aan toe te kennen, maar de waarde $F(\mu_3)$.

Zodoende schat men soms te hoog en soms te laag, maar de verschillen strooien toevallig rond deze centrale waarde en wijken niet systematisch naar boven af. In het algemeen kan men de faalkans van het eerste faaltijdstip beter schatten als $F(\mu_1)$; de

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (4a)

volgorde van falen (1)	standtijd (2)	geschatte faalkans $\hat{F}(t)$	
		mediane rangorde (3)	kansverdeling populatie (4)
1	36	0,21	0,12
2	64	0,50	0,50
3	124	0,79	0,79

Figuur 48
Volgens mediane-rangorde-punten geschatte faalkansen bij een steekproef uit drie elementen

Uit de genoemde formule om de mediane-rangorde-punten voor de faalkans te benaderen, kunnen schatters voor andere faalgedragskenmerken worden afgeleid:

$$\hat{R}(t_i) \approx \frac{n - i + 0,7}{n + 0,4}$$

$$\hat{f}(t_i, t_{i+1}) \approx \frac{1}{(n + 0,4)(t_{i+1} - t_i)}$$

$$\hat{z}(t_i, t_{i+1}) \approx \frac{1}{(t_{i+1} - t_i)(n - i + 0,7)}$$

Onvolledige steekproeven

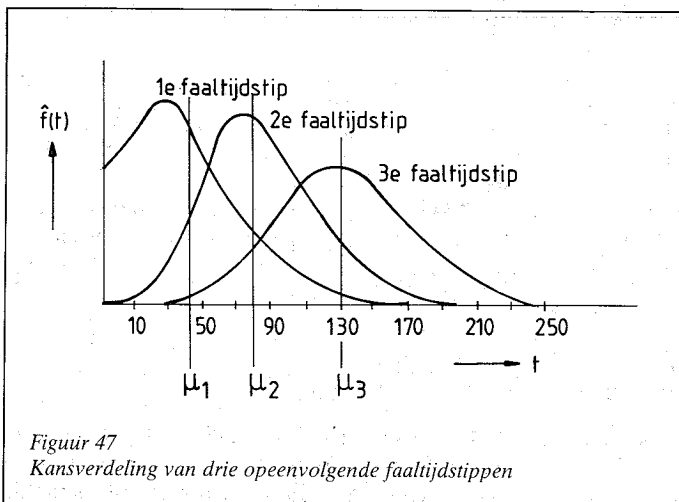
Het kan voorkomen dat men de faalgedragskenmerken van een populatie wil schatten op grond van een steekproef, die zowel componenten omvat die reeds gefaald hebben als exemplaren die nog functioneren, bij voorbeeld omdat men voor afsluiting van de proef reeds conclusies wil trekken.

Het is in zo'n geval mogelijk dat alle reeds gefaalde componenten een standtijd hebben die korter is dan die van alle nog bedrijfsgerede exemplaren. De schatting van de faalgedragskenmerken heeft dan betrekking op een periode die overeenkomt met de standtijd van het exemplaar dat als laatste heeft gefaald; eventueel kan men trachten vanuit die periode het verloop voor langere standtijden te extrapoleren. Het aandeel niet gefaalde exemplaren beïnvloedt naar verhouding de berekende waarden van $F(t)$ en van de overige faalgedragskenmerken.

Minder eenvoudig ligt de zaak indien sommige nog niet gefaalde componenten een bedrijfstijd hebben die korter is dan de standtijd van één of meer defecte exemplaren. Een voorbeeld toont figuur 49 waarin component C nog niet defect is en een bedrijfstijd heeft, die weliswaar langer is dan die van component B, maar tevens korter is dan die van de componenten A en D. Een dergelijke situatie kan zich onder andere voordoen als componenten op verschillende tijdstippen in gebruik zijn gesteld, als hun bedrijfsperiode werd onderbroken, als zij intussen preventief zijn vervangen.

Figuur 49
Waargenomen stand- cq bedrijfstijden bij een onvolledige steekproef uit vier elementen

component	gefaald?	bedrijfstijd t
A	ja	274
B	ja	84
C	nee	91
D	ja	122



Figuur 47
Kansverdeling van drie opeenvolgende faaltijdstippen

vraag is dan wel: hoe groot is $F(\mu_i)$ bij een steekproef uit n elementen?

Aangetoond kan worden dat de kansverdelingen van het i^e faaltijdstip in de steekproeven kan worden beschreven met een β -verdeling, ongeacht de vorm van de faalkansdichtheidsfunctie van de elementen in de populatie [39]. Dit opent de mogelijkheid voor steekproeven uit n elementen om voor het eerste faaltijdstip zowel de te verwachten ligging van de centrale waarde als de bijbehorende faalkans $F(\mu_i)$ te bepalen. Aangezien een β -verdeling gewoonlijk scheef is, moet men nader vaststellen welke centrale waarden μ_i men kiest: de verwachtingswaarde, de modus of de mediaan. Gewoonlijk neemt men de mediaan, dus het 50% punt, zodat de aantallen componenten die naar verwachting voor en na het eerste faaltijdstip falen, gelijk zijn.

De opeenvolgende waarden van $F(\mu_i)$ betrokken op de medianen, de zogenaamde mediane-rangorde-punten, zijn getabelleerd, bij voorbeeld [39]. In deze tabellen kan men dus aflezen welke te verwachten faalkans behoort bij de i^e waarneming van een oplopende reeks standtijden in een steekproef uit n componenten. Deze punten kunnen worden benaderd met de formule

$$\hat{F}(\mu_i) \approx \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Voor de in figuur 45 vermelde steekproef van drie waarnemingen leidt dit tot de schattingen die vermeld zijn in figuur 48, kolom 3. In figuur 48 kolom 4 zijn de theoretische faalkansen vermeld, zoals die te berekenen zijn uit de eerder genoemde kansverdeling van de populatie die voor de trekkingen is gebruikt. Volgens verwachting blijkt het toepassen van mediane-rangorde-punten tot aanzienlijk betere schattingen te leiden dan de methode voor grote steekproeven, vergelijk figuur 45. Niettemin zijn bij dergelijke zeer kleine steekproeven, ook bij toepassing van deze verbeterde methode, incidenteel nog vrij grote afwijkingen mogelijk.

als zij zijn bezweken door andere faalmechanismen dan het onderzochte of als een combinatie van deze mogelijkheden is opgetreden. In zulke gevallen kan men de nog niet gefaalde componenten buiten beschouwing laten, maar men negeert daarmee waardevolle informatie die vooral bij kleine steekproeven node gemist kan worden. Er zijn verschillende methoden beschikbaar om de informatie die is vervat in de niet gefaalde exemplaren te kunnen gebruiken, bij voorbeeld [40].

Wij behandelen hier een andere werkwijze [39] en volgen het daarin vermelde voorbeeld. Bij deze werkwijze worden op de rangorde waarin de componenten zijn gefaald, correcties aangebracht die afhangen van de bedrijfstijden die de nog niet gefaalde exemplaren hebben bereikt. In figuur 49 heeft component B de kortste standtijd en krijgt als zodanig volgordenummer één. Als de beproeving van component C voortgezet zou kunnen worden, kunnen zich drie situaties a, b en c voordoen (figuur 50).

volgorde	component	a standtijd	component	b standtijd	component	c standtijd
1	B	84	B	84	B	84
2	C	91 < t < 122	D	122	D	122
3	D	122	C	122 < t < 274	A	274
4	A	274	A	274	C	t > 274

Figuur 50
Mogelijke volgorden van falen bij de onvolledige steekproef volgens figuur 49

Falen van component C kan dus geschieden in tweede, derde of vierde positie, in de aangegeven intervallen. Men neemt nu aan dat de kans op falen van component C in elk van deze intervallen even groot is. Als gecorrigeerd rangordenummer van de gefaalde componenten geldt dan het rekenkundig gemiddelde van alle mogelijke volgorden. De gecorrigeerde rangordenummers zijn dus, figuur 51, kolom 3:

$$D : (3 + 2 + 2) : 3 = 2,33$$

$$A : (4 + 4 + 3) : 3 = 3,67$$

component	standtijd	gecorrigeerde volgorde	faalkans $\hat{F}(t)$
(1)	(2)	(3)	(4)
B	84	1	0,159
D	122	2,33	0,461
A	274	3,67	0,766

Figuur 51
Volgens mediane-rangorde-waarden geschatte faalkansen bij een onvolledige steekproef uit vier elementen

Staat daarmee de gecorrigeerde volgorde vast, dan kunnen de faalkansen en de daaruit af te leiden faalgedragskenmerken met behulp van de mediane-rangorde-punten worden berekend met de benaderingsformules. Het resultaat voor $\hat{F}(t)$ toont figuur 51, kolom 4.

Bij grotere aantallen componenten wordt voor deze methode het rekenwerk zeer tijdrovend, maar er bestaat een eenvoudige formule om dit te beperken. Deze formule geeft de toename ΔT in het volgordenummer aan per defecte component, gelegen tussen twee opeenvolgende niet-gefaalde componenten X_i en X_{i+1} .

Noem:

p : het volgordenummer van de component die onmiddellijk voorafgaat aan component X_i

q : het aantal gefaalde en niet gefaalde componenten na component X_i

n : het totale aantal componenten in de steekproef, zowel gefaalde als niet-gefaalde.

Voor de defecte componenten tussen de niet-defecte componenten X_i en X_{i+1} geldt nu:

component	bedrijfstijd c.q. standtijd	gefaald?
B	84	ja
C	91	nee
D	122	ja
A	274	ja
G	301	nee
F	320	ja

Figuur 52
Bedrijfstijden cq standtijden van zes componenten

$$\Delta T = \frac{n + 1 - p}{1 + q}$$

Vanaf component X_{i+1} wordt voor de bepaling van p en q in plaats van X_i gelezen: X_{i+1} etcetera.

Voorbeeld

Stel dat er zes componenten zijn die de volgende uitkomsten opleveren (figuur 52):

Het is duidelijk dat B het volgordenummer 1 heeft. Alleen gefaalde componenten krijgen een, gecorrigeerd, volgordenummer, dus C (en later ook G) slaan we over. Het volgordenummer van D is $1 + \Delta T$, waarbij

$$\Delta T = \frac{(6 + 1) - 1}{1 + 4} = \frac{6}{5} = 1,2$$

Dus D krijgt volgordenummer $1 + 1,2 = 2,2$. Het volgordenummer van de volgende component A heeft dezelfde toename en is dus 3,4 ($= 2,2 + 1,2$). De toename in volgordenummers van gefaalde componenten is constant totdat in de rij een niet-gefaalde component voorkomt. Dus na G moet een nieuwe toename ΔT worden berekend. Het volgordenummer van F is gelijk aan $3,4 + \Delta T$ met

$$\Delta T = \frac{(6 + 1) - 3,4}{1 + 1} = 1,8$$

Dus het volgordenummer van F = $3,4 + 1,8 = 5,2$

(wordt vervolgd)

Literatuur

- [33] Green, A.E., Bourne, A.J., *Reliability Technology*, Wiley New York, (1972)
- [34] Edwards, G.T., *The variability of failure rate data*, UKAEA (1979)
- [35] Henley, E.J., Kumamoto, H., *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1980)
- [36] Anon., *An Introduction to the Systems Reliability Service (SRS) Data Bank*, UKAEA.
- [37] VDI Richtlinie 4010, *Grundanforderungen an einer Datensammlung zur Bestimmung von Ueberlebens- und Erhaltungskenngrößen*.
- [38] Keil, S., *Statistische Natur der Ergebnisse von Lebensdauerbestimmungen und Auswertung dieser Ergebnisse mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, VDI-Lehrgang Statistik in der Mess- und Versuchstechnik, Düsseldorf (1978)
- [39] Kapur, K.C., Lamberson, L.R., *Reliability in engineering desing*, John Wiley, New York (1977)
- [40] Geurts, J.H.J., *Nonparametric estimation of the survival probability function when some observations are incomplete*, Terotechnica 1 (1979), p. 39-45.
- [41] Kapur, K.C., Mann, N.R. Tables for obtaining the best linear invariant estimates of parameters of the Weibull distribution, *Technometrics* Vol. 9 nr. 4, nov. 1962, p. 629-645.
- [42] Koslow, B.A., Ushakow, I.A., *Handbuch zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure*, Carl Hanser Verlag, München, 1979.