

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten

Citation for published version (APA):

Mooren, van der, A. L., & Smith, P. (1982). Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten. *Constructeur*, 21(12), 22-28.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1982

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:

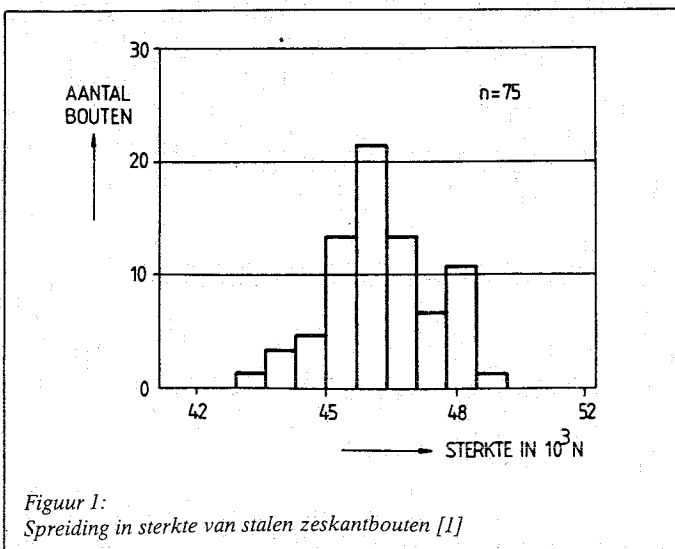
openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten

Bij gebruik blijken werktuigkundige objecten, zoals machines, apparaten, voertuigen en dergelijke, na verloop van tijd te falen, dat wil zeggen het vermogen te verliezen om hun functie in voldoende mate te vervullen. Als gevolg van toenemende beschadigingen gaan één of meer componenten, en daarmee het object als geheel, over van een bedrijfsgerede in een defecte toestand. Een bijzondere vorm van falen is het plotseling volledig wegvallen van het vermogen tot functievervulling, bij voorbeeld door breuk of door vastlopen van een mechanisme. De bedrijfsduur tot aan het moment van falen, dus de periode dat een component, c.q. het object standhoudt, noemen wij zijn standtijd. Wij vermijden in dit verband het woord levensduur omdat zowel de technische als de economische levensduur van een object geen technische, maar economische begrippen zijn.

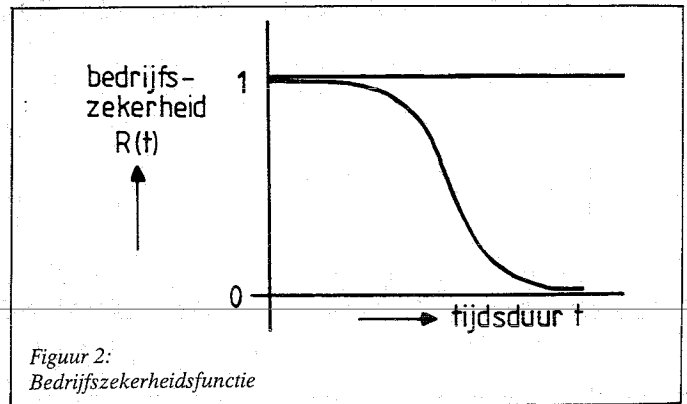
Van oudsher ligt in de werktuigbouwkunde de nadruk meer op het verklaren van falen van componenten, en in het verlengde daarvan op het voorkomen daarvan, dan op het voorspellen van hun begrensde standtijd. Bij sterkteberekeningen wordt meestal door invoering van een zogenaamde veiligheidscoëfficiënt beoogd 'de' belastbaarheid van een component groter te kiezen dan 'de' belasting, en impliciet aangenomen dat zodoende een onbeperkte standtijd het resultaat zal zijn; denk bij voorbeeld aan de gebruikelijke berekeningswijze van bouten, assen. Soms wordt weliswaar een eindige standtijd berekend, maar men veronderstelt dan gewoonlijk dat identieke componenten onder gelijke belastingen alle op hetzelfde tijdstip zullen falen: belasting, belastbaarheid en standtijd worden als deterministische grootheden gezien, waarvan de waarden exact bekend zijn. Bij de berekening van wentellagers bij voorbeeld wordt de getabelleerde B10-waarde veelal als 'de' standtijd opgevat. Daarmee wordt voorbij gegaan aan spreiding in standtijden die men kan waarnemen bij gelijke componenten, ook als zij onder dezelfde omstandigheden worden gebruikt. Bij wentellagers kan de grootst optredende standtijd vele malen de kleinst voorkomende waarde bedragen.



Figuur 1: Spreiding in sterkte van stalen zeskantbouten [1]

Blijkbaar zijn belasting en/of belastbaarheid van componenten van geval tot geval toch niet identiek. Als illustratie toont figuur 1 de spreiding in sterkte binnen een partij 'identieke' zeskantbouten.

Wil men de werkelijkheid beter benaderen, dan moeten belasting, belastbaarheid en standtijd van componenten als stochastische grootheden in het ontwerp worden verwerkt, dat wil zeggen als grootheden waarvan de waarde een spreiding vertoont die kan worden beschreven door een kansverdeling. Stochastische grootheden worden ook wel stochasten of kansvariabelen genoemd, hun symbolen worden onderstreept. Bij deze zogenaamde probabilisti-



sche benadering, zoals die bij voorbeeld bij vermoeingsberekeningen van vliegtuigcomponenten en offshore constructies worden gevolgd, kan men dan rekenen met de bedrijfszekerheid (of overlevingskans) $R(t)$, dat wil zeggen de kans dat de standtijd een bepaalde tijdsduur t zal bereiken of overschrijden. Uiteraard vertoont $R(t)$, uitgezet als een functie van t een monotoon dalend verloop, te beginnen bij 1 en eindigend bij 0, bij voorbeeld volgens figuur 2. Door betere afstemming van de belastbaarheid op de belasting kan men zodoende komen tot grensconstructies met ingecalculerde risico's; daarvan kan onder andere materiaalbesparing het gevolg zijn.

Geschiedenis van het bedrijfszekerheidsdenken

De probabilistische benadering van het gedrag van technische objecten heeft een korte geschiedenis. De kiem van de theorieën zoals wij die nu kennen lag waarschijnlijk al in de tweede Wereldoorlog, maar deze ontwikkelde zich pas tijdens de Koreaanse oorlog (1950-53). De Amerikaanse krijgsmachtonderdelen constateerden onder andere dat hun elektronische apparatuur (radio's, radar en dergelijke) een lage bedrijfszekerheid vertoonde; een onderzoek van de marine wees uit dat slechts 30% van de apparaten op een gegeven moment functioneerde, hoewel men jaarlijks op iedere geïnvesteerde dollar er twee aan onderhoud besteedde. Daarom installeerde het Amerikaanse ministerie van defensie in 1952 een commissie, AGREE genaamd (Advisory

Group on Reliability of Electronic Equipment), die in 1957 een rapport uitbracht dat het bedrijfszekerheidsdenken sterk heeft bevorderd. De commissie adviseerde onder andere de bedrijfszekerheid kwantitatief te omschrijven in het programma van eisen.

Ongeveer tegelijkertijd (1950) richtten de luchtvaartmaatschappijen een gezamenlijke onderneming op, die de bedrijfszekerheid van radiobuizen moest verbeteren: ARINC (Aeronautical Radio Inc.). In het begin bestond haar taak uit het verzamelen van defecte radiobuizen, het terugsturen van die buizen naar de fabrikant en het bijhouden van standtijdstatistieken. Later verschenen vele toonaangevende studies op bedrijfszekerheidsgebied van de hand van de ARINC-medewerkers. Beide, zowel AGREE als ARINC, gingen voor het eerst uit van een probabilistische definitie van bedrijfszekerheid, die later door vrijwel iedereen werd overgenomen. Hun pioniersarbeid resulteerde in een theorie die sterk was geënt op de elektronica; de gebruikte modellen zijn karakteristiek voor het faalgedrag van elektronische apparatuur.

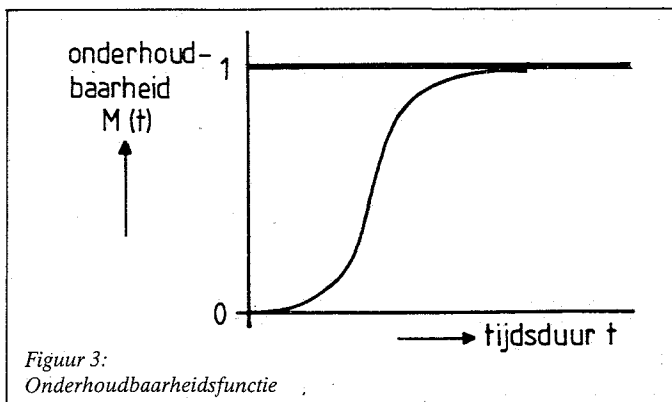
Het bedrijfszekerheidsdenken over mechanische systemen volgde pas later, onder invloed van twee impulsen, de eerste in 1957. In dat jaar werd de eerste Sputnik door de Sovjet-Unie gelanceerd. Als gevolg hiervan werd in Amerika het ruimtevaartprogramma versneld, de NASA werd opgericht en er kwam meer aandacht voor bedrijfszekerheidsproblemen bij raketten, systemen waaraan geen onderhoud plaatsvindt. De tweede impuls werd gegeven door de opkomst van kernenergiecentrales. Bedrijfszekerheidsbeschouwingen als hulpmiddel om veilige objecten te bouwen kwamen in de belangstelling, terwijl systemen die worden onderhouden meer aandacht kregen. Bovendien werd op commerciële basis begonnen met het verzamelen van bedrijfszekerheidsgegevens. Voor een iets uitgebreidere verhandeling over de geschiedenis van het bedrijfszekerheidsdenken wordt verwezen naar [2].

Men kan dan ook stellen dat de probabilistische aanpak van ontwerpproblemen inmiddels niet nieuw meer is, zoals ook uit de vakliteratuur blijkt. Wel valt op dat daarin het onderhoudsgebeuren nog vaak buiten beschouwing blijft, hetgeen voor vele werktuigkundige objecten niet realistisch is. Verbeteringen in hun bedrijfszekerheid die technisch en/of economisch niet te realiseren zijn, worden immers veelal bereikt door preventieve onderhoudsacties, bij voorbeeld periodieke vervanging van componenten. Juist het onderhoudsaspect vormt echter een actuele aanleiding om de probabilistische benadering verder te ontwikkelen en breder toe te passen, omdat daarin goede aanknopingspunten liggen om in de ontwerpfasen te komen tot voorspelling van de benodigde onderhoudsacties. Dit is bij veel producten noodzakelijk geworden omdat de gebruiker de onderhoudsbehoefte als belangrijk kwaliteitskenmerk is gaan onderkennen en van de leverancier waarborgen op dit punt gaat eisen.

Onderhoud

Is een object defect, dan kan men de bedrijfsgerede staat herstellen, een vorm van onderhoud. Bij dergelijke onderhoudsacties, uitgevoerd nadat het object heeft gefaald, spreekt men van correctief onderhoud; de acties zijn defectafhankelijk. Het kan gewenst zijn de bedrijfsgerede staat ook in stand te houden door opgelopen beschadigingen te herstellen alvorens het object faalt, bij voorbeeld om onverwachte productieonderbrekingen tegen te gaan. Ook dergelijke acties rekent men tot onderhoud, maar men noemt dit preventief onderhoud. In ruimere zin genomen zijn ook het verzorgen van het object (smeren, bijvullen etcetera), alsmede het vervolgen van zijn conditie door inspecteren en controleren, preventieve acties.

Door preventieve en correctieve onderhoudsacties wordt de goede staat van een object geheel of gedeeltelijk hersteld, hetgeen een onderhoudstijd vergt. Identieke onderhoudsacties die bij dezelfde objecten (c.q. hun componenten) met dezelfde middelen worden uitgevoerd, blijken niet steeds dezelfde onderhoudstijden te ver-



Figuur 3: Onderhoudbaarheidsfunctie

gen. Ook hierbij geldt dat de overeenkomst tussen de acties niet volkomen is, bij voorbeeld doordat al dan niet vastzittende of afbrekende verbindingsmiddelen de duur van de demontage beïnvloeden. Wat de onderhoudsmiddelen betreft kunnen verschillen in vakmanschap en/of motivatie van de vaklieden een rol spelen. Wij beschouwen daarom ook de onderhoudstijd als een stochastische grootte die kan worden beschreven door een kansverdeling, en hanteren in dit verband het begrip onderhoudbaarheid $M(t)$, zijnde de kans dat een onderhoudsactie een zekere tijdsduur t niet zal overschrijden. Uiteraard vertoont $M(t)$ een monotoon stijgend verloop, te beginnen bij 0 en eindigend bij 1 (figuur 3).

Onderhoudspolitieken en onderhoudsconcept

De bedrijfszekerheid van een object wordt dus niet alleen door zijn constructie bepaald, maar in belangrijke mate ook door de wijze waarop men al dan niet preventieve acties bij zijn componenten uitvoert; de verschillende procedures die daarbij mogelijk zijn, noemt men onderhoudspolitieken. Deze onderscheiden zich nader ten aanzien van het tijdstip waarop men de eventuele preventieve acties uitvoert, bij voorbeeld op grond van een bepaalde verstreken gebruiksduur of op grond van de resultaten van inspectie en/of controle; men spreekt dan van respectievelijk gebruiksafhankelijke acties (bij voorbeeld periodieke vervanging) en toestandsafhankelijke acties (zoals vervanging op basis van conditiebewaking door trillingsanalyse). De typische combinatie van onderhoudspolitieken die men bij een object volgt ten aanzien van zijn componenten, vormt onderdeel van zijn onderhoudsconcept. Het onderhoudsconcept van een object is te zien als het totaal van alle spelregels die men hanteert voor het uitvoeren van onderhoudsacties. Daartoe zijn dus ook te rekenen, keuzen ten aanzien van de frequentie van preventieve acties, de goed- en afkeurmaten en de wijze waarop men bij correctieve acties niet alleen defecte, maar ook andere, beschadigde componenten herstelt.

Levensduurkosten

De onderhoudsacties aan een object moeten worden uitgevoerd met onderhoudsmiddelen: mankracht, uitrusting, reservedelen etcetera, die kosten oproepen. Het kunnen gebruiken van het object als produktiemiddel vergt dus niet alleen eenmalige aanschafkosten, maar bij voortduring ook onderhoudskosten. Hun som vormt de prijs die men moet betalen om gedurende een zekere periode van het object te kunnen profiteren en is als zodanig een bestanddeel van de kosten van het verkregen produkt of dienst. In deze som, gewoonlijk aangeduid met levensduurkosten, zijn de totale onderhoudskosten meestal van dezelfde orde als de aanschafkosten, soms zelfs een veelvoud daarvan. Dit geldt in versterkte mate indien tot de onderhoudskosten niet alleen de kosten worden gerekend voor het inzetten van de onderhoudsmiddelen, de onderhoudsuitvoeringskosten, maar ook de opbrengstverliezen die het gevolg zijn van falen van het object en van preventieve acties, de zogenaamde onderhoudsafhankelijke kosten. Deze verliezen zijn sterk afhankelijk van de afzetsituatie en daarom moeilijk te schatten; zij worden vaak op dezelfde orde van grootte gesteld als de onderhoudsuitvoeringskosten.

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten

Onderhoudsbewust ontwerpen

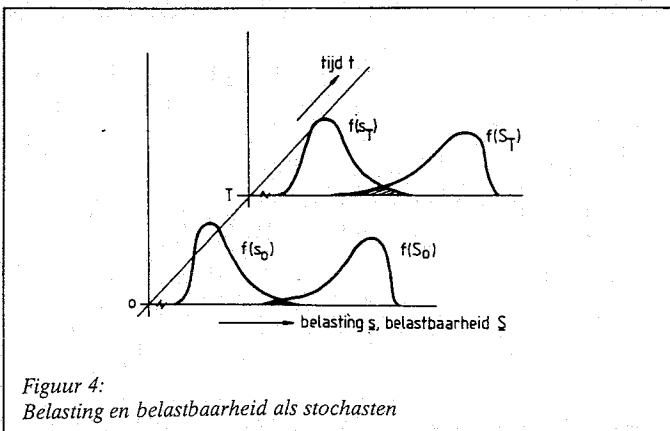
De hoogte van de onderhoudsuitvoeringskosten hangt af van:

- het aantal benodigde onderhoudsacties, zowel preventieve als correctieve
- de benodigde offers per onderhoudsacties, in het bijzonder de onderhoudstijd.

Deze factoren liggen in belangrijke mate in de constructie van het object verankerd, zoals die bij het ontwerpen is gekozen. Onderhoudsbewust ontwerpen beoogt de te verwachten onderhoudskosten te betrekken in de keuze van optimale constructieve oplossingen [3]. Daarin moeten ook het nog te kiezen onderhoudsconcept en de beschikbare onderhoudsmiddelen worden betrokken. Beschouwen wij de gebruikscondities als gegeven, dan bestaan er immers voor het beheersen van de onderhoudskosten de volgende ingangen:

- het ontwerp; overweeg bij voorbeeld of het gewenst is de bereikbaarheid van de componenten te verbeteren teneinde de tijdsduur van acties te bekorten
- het onderhoudsconcept; overweeg bij voorbeeld of het gewenst is door meer preventieve acties het aantal correctieve acties te beperken
- de onderhoudsmiddelen; overweeg bij voorbeeld of met speciaal gereedschap acties beter en sneller kunnen worden uitgevoerd.

Bij dit streven speelt het ontwerp doorgaans de belangrijkste rol. Het beïnvloedt het onderhoudsgebeuren direct, bij voorbeeld via de standtijd van de componenten, maar ook indirect, want het stelt randvoorwaarden bij de keuze van het onderhoudsconcept (zoals het kunnen demonteren met behulp van een kraan). Gewoonlijk roepen verbeteringen uit onderhoudsoogpunt langs één of meer van deze wegen elders extra kosten op, zoals het geval is bij hogere aanschafkosten, zodat men moet zoeken naar het optimum in de vorm van minimale levensduurkosten. Daarbij ontstaat dan de behoefte om kwantitatief inzicht te krijgen in de te verwachten bedrijfszekerheid en onderhoudbaarheid van het object; gezien de aard van het probleem vergt dit een probabilistische aanpak.

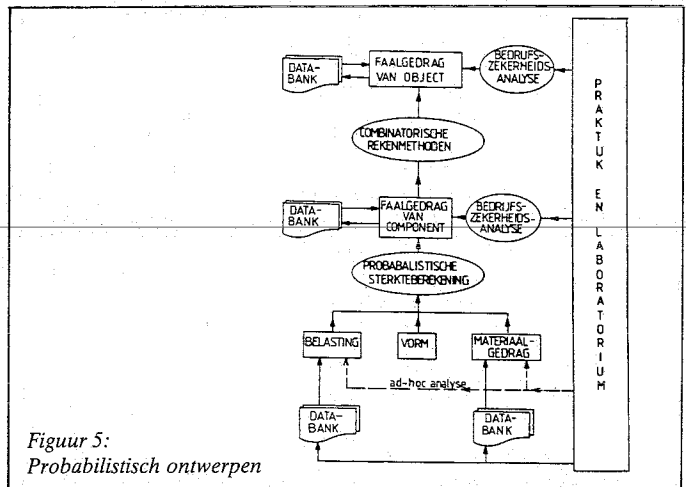


Figuur 4: Belasting en belastbaarheid als stochasten

Beschikbare gegevens

Indien men de probabilistische aanpak in de praktijk wil brengen en daarbij niet over de middelen (tijd, geld) beschikt om voldoende prototypen te bouwen en te beproeven van het object als geheel, moet men zich baseren op het berekende of uit waarnemingen bekende eigenschappen van componenten. Om de bedrijfszekerheid van een component te berekenen kan men teruggaan tot de constructieve basisgegevens van zijn samenstellende delen: hun geometrie (vorm, afmetingen, afwerking) en uit tabellen bekende materiaaleigenschappen. In principe is het mogelijk daaruit zijn belastbaarheid af te leiden, niet alleen bij mechanische maar ook bij chemische, thermische en andere invloeden. Aangezien deze gegevens van stochastische aard zijn (bij voorbeeld maattoleranties), zal ook de berekende belastbaarheid een stochastisch kenmerk zijn (figuur 4).

Vergelijkt men de belastbaarheid met de (al dan niet als stochast geformuleerde) belasting, dan kan daaruit in beginsel de bedrijfszekerheid worden berekend. In het Engels gebruikt men voor deze aanpak de term 'probabilistic design'; wij noemen dit probabilistische sterkteberekening. Maatstaf voor de kans op falen is de overlap van de 'staarten' van beide verdelingen, zie de arceringen. Dit vormt een zwak punt van de methode, want het verloop van de staarten is in het algemeen slecht bekend en sterk afhankelijk van de verdelingen die men op grond van een beperkt aantal empirische gegevens kiest; bovendien kunnen vorm en ligging van de verdelingen mettertijd wijzigingen ondergaan. Deze manier van berekenen is nog weinig ontwikkeld en blijft in dit artikel verder buiten beschouwing; verwezen zij naar de literatuur [4], [5], [6], [7] en [8].



Figuur 5: Probabilistisch ontwerpen

Een tweede mogelijkheid (figuur 5) is om de bedrijfszekerheid van componenten af te leiden uit waarnemingen in de praktijk of in het laboratorium aan soortgelijke exemplaren die onder overeenkomstige omstandigheden functioneren. In het Engels gebruikt men voor deze methode de term 'reliability analysis', wij noemen dit bedrijfszekerheidsanalyse. Deze aanpak is wel verder ontwikkeld, maar kostbaar in uitvoering omdat veel gegevens moeten worden verzameld, verwerkt en bewaard; dientengevolge is de methode in het algemeen slechts bruikbaar voor standaard-componenten (lagers, kettingen, koppelingen en dergelijke) en voor herhaalconstructies. De uitspraken kunnen dan (mede) worden gebaseerd op steekproeven in de praktijk en de kosten kunnen worden omgeslagen over een groot aantal objecten. Daarnaast zijn er in de werktuigbouwkunde echter veel componenten die eenmalig worden geconstrueerd zodat geen praktijkgegevens over hun levensloop voorhanden zijn. Het verkrijgen van de benodigde informatie vereist dan toch dure beproevingen van prototypen hetgeen slechts verantwoord zal zijn indien falen ernstige gevolgen kan hebben, bij voorbeeld voor de veiligheid van de mens.

Wa
ter
we
ver
wo:
onc
voc
ver

He
een
we
nut
abs
(en
op
wa:
per
in r

Co
Ind
nen
ken
het
tori
tijk
hou
opt
hou
toe
con
bou
rek
wo

Pro

Op
Ho
tecl
kur
ten
beg
opt
kar
ook
dui
zijn
of e
den
con
ger

Eer
ma:
con
woi
nel
onc
cili
de
ruir
bov

De
han
eig
ver

de c

Wat de onderhoudbaarheid van componenten betreft kan men terugvallen op gegevens zoals die reeds lang worden gebruikt bij de werkvoorbereiding van onderhoudskarweien. Zij kunnen zijn verkregen uit waarnemingen bij overeenkomstige karweien, of worden opgebouwd uit gegevens betreffende de kleinere of grotere onderdelen zoals die in de arbeidsstudie bekend zijn; denk bij voorbeeld aan MTM. Vaak wordt uitgegaan van schattingen door vergelijking met soortgelijk werk (ijkkarweien, UMS).

Het ontbreken van voldoende betrouwbare gegevens vormt vaak een belemmering voor een probabilistische aanpak van een ontwerp. Wel dient men te bedenken dat dergelijke berekeningen ook nuttig kunnen blijken indien men het gedrag van het object niet in absolute zin kan bepalen wegens ontbrekende gegevens over (enkele) componenten. Zij maken het dan toch mogelijk om, mede op grond van geschatte gegevens, inzicht te verkrijgen in de wijze waarop en de mate waarin de componenten met hun eigenschappen de bedrijfszekerheid en de onderhoudbaarheid van het object in relatieve zin beïnvloeden.

Combinatorische rekenmethode

Indien de bedrijfszekerheid en de onderhoudbaarheid van componenten bekend zijn, moet men over een berekeningswijze beschikken om daaruit de bedrijfszekerheid en de onderhoudbaarheid van het daaruit opgebouwde object te berekenen. Dergelijke combinatorische rekenmethoden moeten voldoende aansluiten bij praktijksituaties om tot relevante resultaten te kunnen leiden. Dit houdt onder andere in dat zij niet alleen met de constructieve opbouw, dus bij voorbeeld met volgeschade rekening moeten houden, maar bij objecten die worden onderhouden ook met het toegepaste onderhoudsconcept, zoals periodieke vervanging van componenten. Omdat juist dergelijke objecten in de werktuigbouwkundige praktijk een grote rol spelen en de beschikbare rekenmethoden daarop niet zijn afgestemd, dient in deze lacune te worden voorzien; daartoe wil deze studie een bijdrage leveren.

Probleemstelling

Opbouw van een object

Hoewel de inhoud van deze studie van toepassing is op allerlei technische systemen, richten wij ons in het bijzonder op werktuigkundige objecten in ruime zin, dus zowel huishoudelijke apparaten, als industriële installaties en transportmiddelen. Met het begrip object wil nog niets gezegd zijn over zijn complexiteit, zijn opbouw uit onderdelen en zijn aandeel in een groter geheel; het kan een ingewikkelde chemische installatie zijn, maar daarbinnen ook een eenvoudige afsluiter. Samenstellende delen van het object duiden wij aan als componenten; van een auto kan dat de motor zijn, maar ook een onderdeel (onderdeel uit één stuk): de krukas, of een deel daarvan, bij voorbeeld de astap. Zo nodig onderscheiden wij binnen het object nog onderhoudsmodulen, groepen van componenten die gezamenlijk worden vervangen en elders worden gerepareerd, zoals een tandwielkast.

Een object wordt niet alleen gedefinieerd door zijn componenten, maar ook door zijn structuur, dat wil zeggen de wijze waarop de componenten zijn samengebouwd. Daarbij kan nader onderscheid worden gemaakt tussen twee samenhangende aspecten: de functionele en de materiële structuur. De functionele structuur bepaalt onder andere de volgorde van de componenten, bij voorbeeld of de cilinders van een compressor parallel of in serie zijn geschakeld, in de materiële structuur ligt de wijze vast waarop de componenten ruimtelijk zijn geordend: of de cilinders horizontaal of verticaal en boven of naast elkaar zijn geplaatst.

De bedrijfszekerheid en de onderhoudbaarheid van een object hangen niet alleen af van de mate waarin zijn componenten deze eigenschappen bezitten, maar ook van zijn structuur. Denk aan verhoging van de bedrijfszekerheid door parallel- of serieschake-

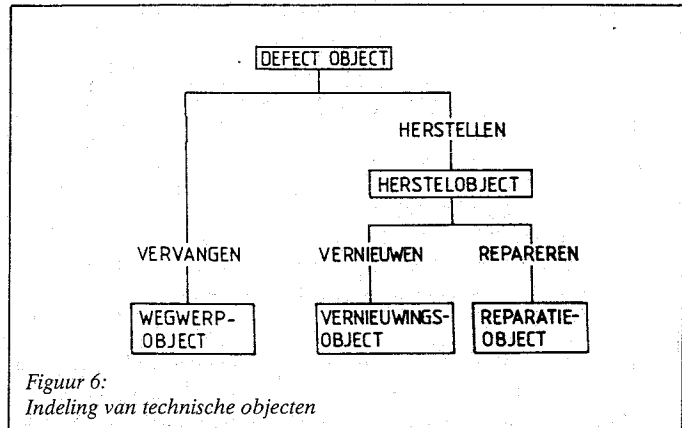
ling van componenten die elkaars taak kunnen overnemen (redundantie) en aan verbetering van de onderhoudbaarheid door betere bereikbaarheid van de componenten.

Classificatie

Heeft een object gefaald en wil men zijn functie voortzetten, dan bestaan de volgende mogelijkheden (figuur 6):

- het defecte object afdanken en vervangen door een nieuw exemplaar; het betreft een wegwerpobject
- het defecte object herstellen; het betreft een herstelobject.

Wegwerpobjecten hebben een begrensde gebruiksduur die hoogstens hun standtijd bedraagt. Zij zijn meestal relatief goedkoop: eenvoudige gebruiksartikelen, zoals een haardroger, fietsdynamo



Figuur 6:
Indeling van technische objecten

etcetera. Vaak betreft het eenvoudige componenten uit een herstelobject, die worden vervangen indien zij defect zijn geraakt of dreigen te raken, zoals bouten en lagers. Het kunnen ingewikkelde herhaalconstructies zijn die in objecten van allerlei soort voorkomen, in grote aantallen worden gemaakt en mede in verband daarmee, op een wijze worden gefabriceerd die herstel niet of moeilijk toelaat, door het toepassen van niet-losneembare verbindingen, zoals een CV-pomp. Er bestaan echter ook zeer omvangrijke en complexe wegwerpobjecten, zoals raketten.

Herstelobjecten hebben een beperkte standtijd, maar in beginsel een oneindig lange gebruiksduur; in de praktijk wordt deze echter om economische redenen begrensd tot een beperkte levensduur. Bij het herstel van een defect object kan men:

- het object vernieuwen door niet alleen het defect, maar tevens alle overige beschadigingen, ook die aan andere componenten te herstellen, zodat het object 'als nieuw' wordt; het betreft een vernieuwingsobject
- het object repareren door wel het defect te herstellen, maar niet alle overige beschadigingen; het betreft een reparatieobject.

Merk op dat bij deze indeling het vernieuwen van een object niet kan inhouden het vervangen door een nieuw exemplaar.

Het herstel van vernieuwingsobjecten is volledig doordat niet alleen defecte component(en), maar ook alle andere beschadigde componenten, hoewel zij nog bedrijfs gereed zijn, worden vervangen door nieuwe exemplaren of volledig worden herstel. Het herstel van reparatieobjecten is onvolledig; behalve het defect kunnen ook nog andere beschadigingen worden hersteld, maar niet alle.

Werktuigkundige vernieuwingsobjecten zijn schaars, mede om economische redenen; vervanging is vaak voordeliger dan vernieuwing. Vernieuwing wordt veelal goed benaderd bij herstel van eenvoudige objecten indien één beschadigingsvorm domineert, bij voorbeeld het defect raken van een 'slijtdeel' zoals een breekpen in

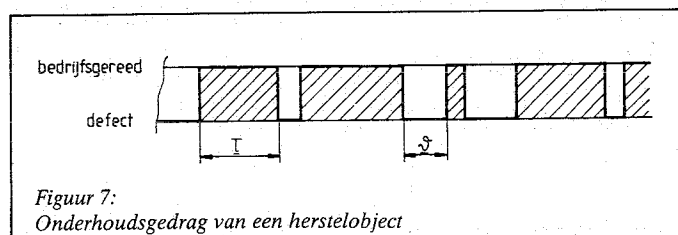
Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten

een koppeling. Vernieuwing wordt nagestreefd bij veiligheidssystemen, zoals remmen en drukveiligheden, en vaak ook bij (grote) revisie van meer ingewikkelde objecten, zoals motoren en gereedschapswerktuigen. De meeste meer ingewikkelde en omvangrijke werktuigkundige objecten, zoals duurdere gebruiksartikelen, voertuigen en apparatuur in de procesindustrie, zijn echter reparatieobjecten.

Onderhoudsgedrag

De opeenvolging van toestanden waarin een systeem zich achtereen volgt bevindt als reactie op invloeden vanuit zijn omgeving, noemt men zijn gedrag. Bij een object dat faalt en wordt hersteld, wisselen twee toestanden elkaar af: de bedrijfsgerede en de defecte (figuur 7). Deze opeenvolging van toestanden kan (vanuit onderhoudsoogpunt bezien) worden aangeduid als het onderhoudsgedrag van het object; het is een proces dat (afgezien van preventieve acties) de resultante is van twee elkaar afwisselende gedragsprocessen:

- het faalgedrag, de opeenvolging van faaltijdstoppen, als resultaat van de (variërende) standtijden τ die het object bereikt
- het herstelgedrag, de opeenvolging van hersteltijdstoppen, als resultaat van de (variërende) onderhoudstijden θ die het object vergt.



Faalgedrag en herstelgedrag bepalen samen aantal en duur van de productieperiodes, c.q. produktieonderbrekingen en leggen daarmee het onderhoudsgedrag vast. Aangezien τ en θ stochastisch zijn, kan het onderhoudsgedrag worden opgevat als de realisatie van een stochastisch proces; de kansverdelingen van deze beide groottebepalen de kenmerken van dit gedragsproces, bij voorbeeld het interval tussen opeenvolgende tijdstippen, uiteraard ook een stochast.

Het onderhoudsgedrag van een wegwerpobject, beperkt zich tot zijn faalgedrag en eindigt met het optreden van het eerste defect. Bij een herstelobject is het moment van het eerste defect ook een interessant gegeven, maar bovendien is zijn gedrag daarna, na herstel, van belang. Zowel bij wegwerp- als herstelobjecten kunnen eventuele preventieve acties het onderhoudsgedrag mede beïnvloeden.

Het is mogelijk dat het onderhoudsgedrag van een object (vrijwel) uitsluitend wordt bepaald door slechts één van zijn componenten.

Zijn het gedrag van die componenten en zijn onderhoudsconcept (preventieve acties) gegeven, dan is daarmee tevens het onderhoudsgedrag van het object als geheel bekend. Uit onderhoudsoogpunt bezien kunnen wij dan spreken van enkelvoudige objecten. Veelal omvat een object twee of meer componenten die een relevante bijdrage leveren tot zijn onderhoudsgedrag; wij noemen dit een samengesteld object. Zijn gedrag is niet alleen afhankelijk van het gedrag van zijn componenten en zijn onderhoudsconcept, maar ook van zijn structuur.

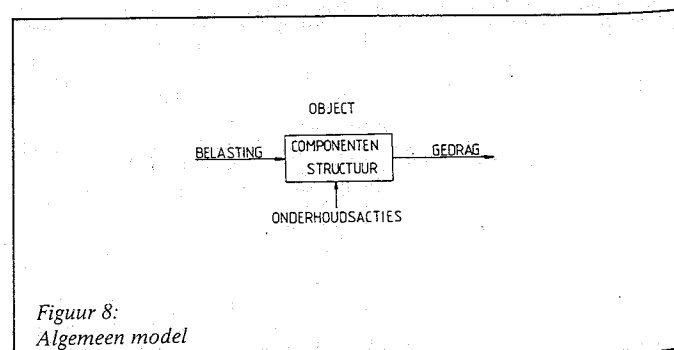
Aangezien het onderhoudsgedrag van technische objecten en hun componenten stochastisch van aard is, vormt de mathematische statistiek het juiste hulpmiddelgereedschap om dit in kwantitatieve zin te beschrijven. Met dit gereedschap kan men, op grond van beschikbare gegevens, het onderhoudsgedrag van componenten karakteriseren. Omdat ook uitspraken mogelijk zijn over gecombineerde kansen, kan men met combinatorische rekenmethoden eveneens het gedrag van uit componenten opgebouwde objecten beschrijven. Het blijkt dat het onderhoudsgedrag van een samengesteld wegwerpobject betrekkelijk eenvoudig is te bepalen; slechts de periode tot het falen van de eerste component is relevant. Ook vernieuwingsobjecten kunnen op vrij eenvoudige wijze worden beschreven omdat na het eerste defect de beginsituatie wordt hersteld. Over deze beide categorieën bestaat veel literatuur en daaruit zullen enkele essentiële punten worden samengevat. Daarbij blijkt dat onderhoudsaspecten vrijwel buiten beschouwing blijven.

Ingewikkelder is de situatie voor een reparatieobject; hierbij is opeenvolging van tijdstippen van belang waarop de verschillende, al dan niet eerder herstelde componenten falen en vervolgens worden hersteld, eventueel samen met andere, nog niet gefaalde, maar wel beschadigde componenten, volgens een gekozen onderhoudsconcept. Over deze belangrijke groep is zeer weinig geschreven; voorzover dit wel het geval is, wordt geen rekening gehouden met de onderhoudstijden, noch met het onderhoudsconcept. Deze categorie objecten wordt in het bijzonder in deze studie behandeld, uitgaande van een daartoe gekozen model.

Model

Parameters.

Het onderhoudsgedrag dat een object vertoont tijdens gebruik, vormt een reactie op de belasting en op de onderhoudsacties. De aard van het gedrag hangt mede af van de constructie van het object, in eerste aanleg van de aard van zijn componenten en van de wijze waarop die in een structuur zijn samengebouwd (figuur 8). Wil men het onderhoudsgedrag van het object in de ontwerpfase voorspellen, dan moet men dit in relatie brengen met de genoemde vier parameters en die elk in kwalitatieve en kwantitatieve zin beschrijven, als resultante van een groot aantal invloedsfactoren. In de belasting spelen onder andere functionele en omgevingsbelastingen mee, maar ook additionele belastingen die binnen het object ontstaan, bij voorbeeld als gevolg van onbalansen en uitlijnfouten. Bij de onderhoudsacties zijn onder andere de aard van de personele en materiële middelen in het geding, alsmede het gevolgde onderhoudsconcept. De componenten worden gedefini-

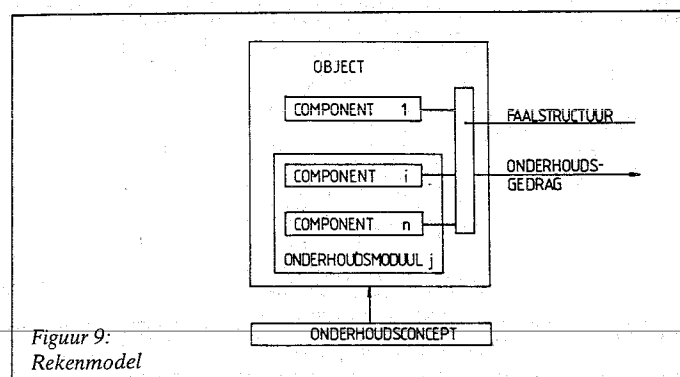


eerd door de vorm, de afmetingen, de afwerking en de materiaaleigenschappen van hun enkeldelen. De structuur van het object heeft functionele aspecten, zoals de volgorde van de componenten, en materiële aspecten, zoals de ruimtelijke ordening van de componenten. Deze (en nog vele andere) invloedsfactoren bepalen niet onafhankelijk van elkaar het onderhoudsgedrag van het object, maar zijn onderling verweven: zo hangt het gedrag van de componenten mede af van de structuur van het object en van de kwaliteit van de onderhoudsmiddelen.

Aangezien het niet goed uitvoerbaar is om zeer veel van dergelijke invloedsfactoren en hun afhankelijkheden in een model onder te brengen, moet stylering plaatsvinden. Gekozen is voor het volgende rekenmodel (figuur 9):

- het faalgedrag en het herstelgedrag van de nader te kiezen componenten wordt bekend verondersteld
- de structuur van het object wordt gereduceerd tot zijn faalstructuur
- de onderhoudsacties worden gekarakteriseerd door het onderhoudsconcept, in het bijzonder door de toegepaste onderhoudspolitieken, door de manier waarop componenten worden hersteld en door de wijze waarop onderhoudsmodulen worden gevormd.

Wij zien thans hoe andere, niet genoemde invloedsfactoren impliciet in deze parameters moeten worden verwerkt.



Figuur 9:
Rekenmodel

Componenten.

Het onderhoudsgedrag van componenten vormt een uitgangspunt. In het aangenomen faalgedrag moet dus de belastbaarheid van een component al zijn verdisconteerd, evenals al zijn belastingen, ook die als gevolg van omgevingsinvloeden, abnormale bedrijfsomstandigheden en onderlinge beïnvloeding van componenten. In het aangenomen herstelgedrag moeten de bereikbaarheid en de demonteerbaarheid van de componenten al zijn verwerkt.

Aangezien componenten uitgangspunt vormen voor de berekening, moet hun grootte in overeenstemming worden gekozen met de grootte van de delen waarop de beschikbare gegevens betrekking hebben. Betreffen die gegevens verschillende, onderling afhankelijke oorzaken van falen van eenzelfde onderdeel van de constructie, bij voorbeeld slijtage en vermoeiing, dan kan men dat onderdeel in twee of meer (fictieve) componenten splitsen. Hebben de beschikbare gegevens echter betrekking op grotere samenstellingen dan de componenten die men in het object wil onderscheiden (zoals op een compressorinstallatie, terwijl slechts de aandrijving relevant is), dan kan men niet anders doen dan het oorspronkelijke waarnemingsmateriaal zo mogelijk verder splitsen.

Faalstructuur.

De faalstructuur van een object wordt gevormd door het geheel van de functionele relaties dat bepaalt in hoeverre het falen van een

of meer componenten al dan niet het falen van het object ten gevolge heeft, denk hierbij aan redundantie. Een bijzondere faalrelatie bestaat indien twee of meer componenten vrijwel gelijktijdig falen als gevolg van een gemeenschappelijke oorzaak (common-mode-failure), bij voorbeeld overbelasting van het object, of volgschade (secondary failure), zoals schade door afgebroken delen. Om met dergelijke relaties rekening te kunnen houden, kan men een groep simultaan falende componenten groeperen tot een faalmoduul.

Onderhoudsconcept.

Het onderhoudsconcept omvat onder andere het geheel van de onderhoudspolitieken die ten aanzien van de componenten worden gehanteerd. In het bijzonder wordt onderscheid gemaakt tussen defectafhankelijke, gebruikafhankelijke en toestandsafhankelijke acties. Aangenomen wordt dat het onderhoudsconcept gedurende de levensduur van het object niet wordt gewijzigd.

Wij gaan er voorts vanuit dat de componenten zo worden gekozen dat eventueel herstel (preventief en correctief) steeds volledig geschiedt, zodat zij hun oorspronkelijke eigenschappen terugkrijgen. Op componentniveau vindt dus slechts vervanging of vernieuwing plaats; gedeeltelijk herstel doordat slechts een deel van de beschadiging geheel en/of gedeeltelijk (provisorisch) wordt hersteld, blijft buiten beschouwing. Om aan deze voorwaarden te voldoen kan men zo nodig enkeldelen opsplitsen in twee of meer (fictieve) componenten, bij voorbeeld een as in een aslichaam en twee astappen die onafhankelijk van elkaar kunnen worden hersteld. Merk op dat in dit model dus enkelvoudige objecten per definitie vernieuwingsobjecten zijn.

Na falen van een component kan zijn herstel gepaard gaan met het herstel van nog één of meer andere componenten. Dit kan het gevolg zijn van het feit dat de andere componenten tot hetzelfde enkeleel of faalmoduul behoren, het kan ook om andere technische en/of economische redenen zo in het onderhoudsconcept zijn opgenomen. Om met dergelijke relaties rekening te kunnen houden, kan men componenten, die simultaan worden vernieuwd, groeperen tot een herstelmoduul.

Voor de beschrijving van het onderhoudsgedrag van een object is het onderscheid tussen een faal- en een herstelmoduul meestal niet relevant. Wij kunnen dan samenvattend spreken van een onderhoudsmoduul, dat is een groep van componenten waarvan er een aantal samen faalt en die allen gezamenlijk worden hersteld. Elke component van een onderhoudsmoduul kan de aanleiding vormen tot het falen, respectievelijk het herstellen van alle anderen.

Opbouw van de studie

Nader geformuleerd is het doel van deze studie om stochastische grootheden en rekenmethoden aan te geven waarmee het onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten kan worden beschreven (figuur 10). Uitgangsgedrag van de componenten, alsmede de faalstructuur van het object en het toegepaste onderhoudsconcept. Als resultaat wordt gezocht naar het onderhoudsgedrag tot het eerste defect en (voorzover van toepassing) gedurende de rest van de levensduur van het object. Dit resultaat moet, aangevuld met relevante kostenfactoren kunnen worden toegepast om in de ontwerpfase uitspraken te kunnen doen over de behoefte aan onderhoudsacties en de te verwachten onderhoudskosten. Daarmee is de mogelijkheid geopend om (langs iteratieve weg) te komen tot constructieve oplossingen die minimale levensduurkosten vertonen. Het is te verwachten dat het resultaat ook bruikbaar is voor het optimaliseren van de onderhoudsuitvoering bij bestaande objecten en als hulpmiddel bij bedrijfskundige vraagstukken, zoals planning en voorraadbeheersing; deze terreinen blijven buiten beschouwing.

De studie beoogt zowel een beknopte weergave te bieden van de huidige stand van kennis, als ook deze kennis aan te vullen, in het

Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten

ten tot aan hun eerste defect kan worden afgeleid. Vervolgens wordt besproken hoe langs verschillende wegen kan worden getracht het onderhoudsgedrag van herstelobjecten gedurende hun gehele levensduur te beschrijven. Op grond van de gebleken mogelijkheden en beperkingen wordt geconcludeerd welke berekeningswijzen in aanmerking komen om het onderhoudsgedrag te beschrijven van wegwerp-, vernieuwings- en reparatieobjecten.

In deel IV komt de praktische toepassing van de gevonden resultaten aan de orde. Behandeld wordt hoe de benodigde gegevens aangaande het onderhoudsgedrag van componenten kunnen worden verzameld, uit databanken en/of eigen waarnemingen. Tenslotte wordt een aantal berekeningsresultaten, verkregen door Monte-Carlo-Simulatie, vermeld en van conclusies voorzien.

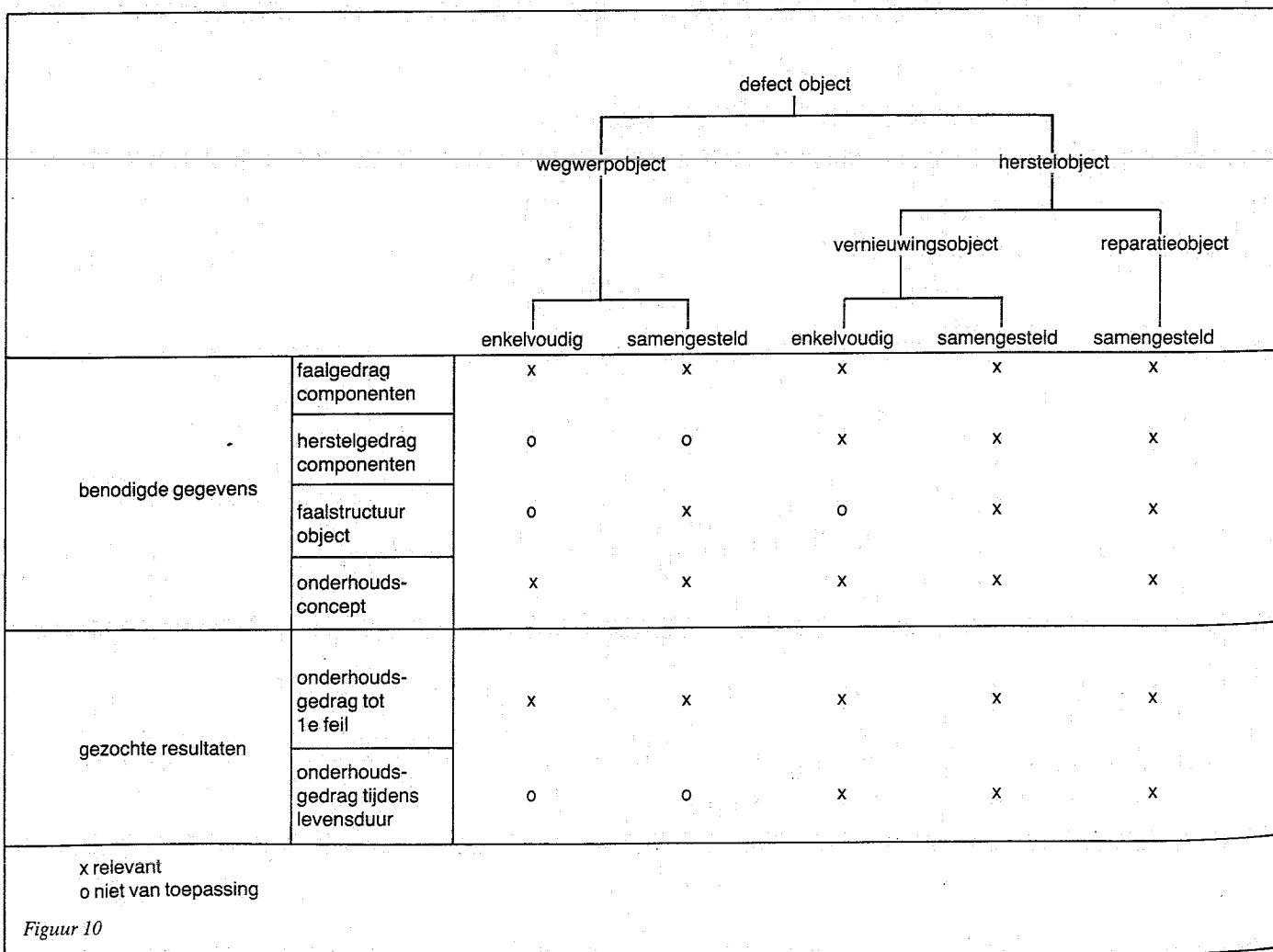
bijzonder ten aanzien van werktuigkundige objecten die na falen weer bedrijfsgereed worden gemaakt, maar niet volledig worden hersteld. Van de lezer wordt slechts enige basiskennis van statistische technieken verwacht; mede daarom is van strikte bewijsvoeringen afgezien.

Het betoog bestaat uit vier delen, die als vier achtereenvolgende artikelen zullen verschijnen. In aansluiting op het voorliggende deel I, wordt in deel II een aantal karakteristieke grootheden en functies van statistische aard gedefinieerd om het faalgedrag en het herstelgedrag van componenten te kwantificeren. Vervolgens wordt nagegaan welke wiskundige functies voor de beschrijving in aanmerking komen.

In deel III wordt aangegeven hoe met combinatorische rekenmethoden het faalgedrag van enkelvoudige en samengestelde objec-

Literatuur

- [1] *Metals Handbook*, Vol. I, 8th Ed., p. 177
- [2] Barlow, R.E. en F. Proschan, *Mathematical theory of reliability*, Wiley, New York, 1965
- [3] Mooren, A.L. van der en P. Smith, *Onderhoudsbewust Ontwerpen in de werktuigbouw*, De Constructeur 1981, nr. 9, p. 76-84 en nr. 10 p. 58-67
- [4] Haugen, E.B., *Probabilistic Approaches to Design*, John Wiley, New York, 1968
- [5] *Probabilistic Design, a realistic look at risk and reliability in engineering*, Machine design, 1975, april 17, p. 98-104; may 1, p. 80-85; may 15 p. 83-87; may 29, p. 54-58; june 12, p. 108-112
- [6] Shooman, M.L., *Probabilistic Reliability, an engineering approach*, McGraw-Hill, New York, 1968
- [7] *Mechanical Reliability*, Product Liability Proceedings, 1976, p. 53-73
- [8] Spoomaker, J.L., *Het ontwerpen op bedrijfszekerheid van producten uit kunststof*, De Constructeur, 1982, nr. 8. p. 18-26.



Figuur 10