

Onderhoud als ontwerpaspect bij werktuigen

Citation for published version (APA):

Mooren, van der, A. L., & Smith, P. (1978). Onderhoud als ontwerpaspect bij werktuigen. *De Ingenieur*, 90(42), 804-811.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1978

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.

alleen in deze vorm een wel erg subjectieve waarde heeft en dat het kostenaspect voor de opdrachtgever een sterk afwijkend gewicht in de schaal kan leggen.

Het resultaat van de evaluatieprocedure is weergegeven in tabel 2. Zonder dat de eindbeoordeling van het 'oostelijk project' (volgnummer D13), op zichzelf spectaculair veel beter is dan die van het 'westelijk project' (volgnummer C8) is het opvallend, dat de oost-variant over de gehele linie van

de primaire normen een gelijke of hogere waardering vindt dan de westelijke variant. Grote pluspunten voor de oostelijke variant zijn met name de scheiding tussen de verkeersstromen van gas, olie en olieproducten en die van stukgoed en industriële producten vrijwel vanaf de ingang van de haven. Voorts de zeer gunstige uitbreidingsmogelijkheden van zowel haven als industriegebied, en in oostelijke en in westelijke richting.

De aanbeveling ten gunste van de oostelijke variant is uiteindelijk ook door de opdrachtgever aanvaard. Het is dan ook deze variant, die nader is onderzocht en uitgewerkt. Verschillende aspecten van deze verdere uitwerking en van de optimalisatie van de lay-out zullen in het volgende artikel van ir. Van Beek worden behandeld.

Onderhoud als ontwerpaspect bij werktuigen

Prof. dr. ir. A. L. van der Mooren en ing. P. Smith

Technische Hogeschool Eindhoven, Vakgroep Werktuigonderdelen en Onderhoud

Dit artikel is een verkorte weergave van twee voordrachten, gehouden door de schrijvers op het Symposium 'Onderhoudsbewust ontwerpen', georganiseerd door de Sectie Werktuigbouwkundig Ontwerpen van de afdeling w&s van het KIVI op 19 april 1978 aan de Technische Hogeschool Eindhoven.

De auteurs hebben dankbaar gebruik gemaakt van inzichten die zijn ontwikkeld binnen de werkgroep 'Onderhoud en Ontwerp' van de NVDO, Vereniging t.b.v. technische en onderhoudsdiensten

Onderhoudskosten spelen een belangrijke rol gedurende de levensduur van werktuigkundige systemen. Zij worden in hoge mate bepaald door de bedrijfszekerheid R en onderhoudbaarheid M van het technisch systeem, die mede resulteren uit de wisselwerking met het onderhoudssysteem.

De ontwerper moet inzicht hebben in de beschikbare onderhoudsmiddelen en de wijze waarop onderhoud wordt uitgevoerd. Een systematische aanpak bij het opstellen van het eisenpakket en het kiezen van de optimale oplossing is vereist om alle relevante onderhoudsaspecten op evenwichtige wijze tot hun recht te laten komen; beoordelingslijsten kunnen daarbij een nuttig hulpmiddel zijn. Praktijkonderzoek bij werktuigkundige componenten lijkt gewenst teneinde aanvullende gegevens te verkrijgen om R en M te kunnen kwantificeren.

Hoewel inventiviteit en vakkennis van de ontwerper doorslaggevend zijn, kunnen toch wegen worden aangegeven waarlangs uit onderhoudsoogpunt constructieve verbeteringen kunnen worden verkregen. Het lijkt mogelijk en gewenst bij de opleiding van ontwerpers aan onderhoudsaspecten van constructies meer systematisch aandacht te besteden.

Of het onderhoudsaspect van technische systemen bijzondere aandacht waard is, wordt in laatste aanleg bepaald door twee factoren: de hoogte van de kosten die met onderhoud gemoeid zijn in verhouding tot andere kostenfactoren, bijv. de aanschafprijs, alsmede door de mogelijkheden om deze gunstig te beïnvloeden. Welnu, alleen al de jaarlijkse kosten voor de uitvoering van onderhoud aan werktuigkundige systemen zijn veelal van dezelfde orde van grootte als de afschrijvingen en de investeringen (beide 5 - 15% van de vervangingswaarde); zij zijn dus in het algemeen qua hoogte zeker interessant. Veelzeggend is ook het feit, dat de onder-

houdskosten over de gehele levensduur van een systeem een veelvoud van de aanschafkosten kunnen bedragen, afhankelijk van de aard en van de gebruiksomstandigheden. In figuur 1 is de verhouding tussen beide 1:1 getekend, wat bij benadering geldt voor bijv. een personenauto. Bij industriële installaties is de factor 1 à 2, voor gevechtsvliegtuigen, een extreem geval, 4 à 5. Wat de mogelijkheid tot beïnvloeding betreft: dit artikel beoogt o.a. te wijzen op het belang van onderhoudsbewust ontwerpen, omdat de onderhoudskosten van werktuigkundige systemen voor een belangrijk deel worden bepaald door de gekozen constructieve oplossingen.

Begripsbepaling

Onderhoud kan worden omschreven als het geheel van de activiteiten dat ten doel heeft technische systemen in een zodanige staat te houden en te brengen dat zij hun functie binnen het geheel van een onderneming optimaal kunnen vervullen. In deze omschrijving heeft het woord 'houden' betrekking op preventieve acties (PM, preventive maintenance), zoals smeren, inspecteren e.d., en het woord 'brengen' op correctieve (curatieve) acties (CM, corrective maintenance), zoals repareren, vervangen e.d.

Onderhoud is een gevolg van het feit, dat technische systemen onderhevig zijn aan abnormale belastingen en aan verval waardoor zij na verloop van tijd falen. Falen is het optreden van een ontoelaatbare afwijking in de goede werking die zich niet alleen kan uiten in onderbreking van de functievervulling, maar bijv. ook in een te laag rendement als gevolg van slijtage.

Soms wordt het defecte systeem onmiddellijk afgedankt, bijv. omdat herstel te kostbaar is, maar in vele gevallen vindt reparatie plaats. Veelal is het van bijzonder belang dat falen met grote waarschijnlijkheid niet binnen een bepaalde periode na de start optreedt. Men spreekt in dit verband van de *bedrijfszekerheid* van het systeem, symbool R (reliability), dat vaak als volgt wordt gedefinieerd:

Bedrijfszekerheid is een eigenschap van een technisch systeem die tot uiting komt in de kans dat het gedurende een bepaalde tijdsduur zonder falen zijn functie vervult, indien het onder bepaalde omstandigheden opereert.

De bedrijfszekerheid van een systeem valt lager uit naarmate de beschouwde periode langer is. Vaak wordt van de bijbehorende verdelingsfunctie één karakteristieke waarde als maat voor R gekozen, t.w. het gemiddelde storingsinterval, bekend als *MTBF*-waarde (mean time between failures).

Is een systeem aan een onderhoudsactie toe, dan hangt het van vele factoren af hoe gemakkelijk, veilig, snel, enz. deze kan worden uitgevoerd. Men spreekt in dit verband van *onderhoudbaarheid*, symbool M (maintainability). Een definitie die echter uitsluitend rekening houdt met het aspect van de tijdsduur, luidt:

Onderhoudbaarheid is een eigenschap van een technisch systeem die tot uiting komt in de kans dat het binnen een bepaalde tijdsduur in een bepaalde toestand kan worden gehouden of teruggebracht met voorgeschreven werkwijzen en middelen.

Ook onderhoudbaarheid van een systeem hangt dus af van een arbitrair gekozen beschouwingsperiode. Men kan voor M verschillende verdelingsfuncties onderscheiden, afhankelijk of men preventieve en/of correctieve acties beschouwt, wachttijden

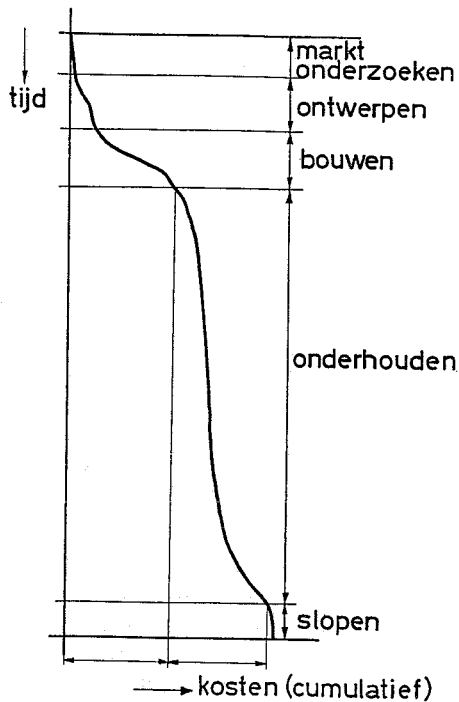


Fig 1: de kosten van werktuigen gedurende de hele levensduur: van marktonderzoek tot sloop

dat volgens de definities R en M van een systeem mede worden bepaald door de gebruiksomstandigheden, waaronder de kwantiteit en de kwaliteit van de onderhoudsmiddelen en het gekozen onderhoudsconcept (onderhoudsstrategie), bijv. preventief onderhoud op basis van conditie-bewaking. Tussen R en M zijn vele verbanden aan te geven, zoals:

- een object met lage M (bijv. slecht toegankelijk voor smeren) wordt in het algemeen ook slecht onderhouden waardoor R wordt verlaagd
- een object met hoge R kan een lage M hebben, omdat routine bij het herstel ontbreekt.

De bedrijfszekerheid R en de onderhoudbaarheid M bepalen samen de *gereedheid A* (availability), gedefinieerd als de kans dat het systeem op een bepaald tijdstip zijn functie kan vervullen. Gemakkelijk is in te zien dat m.b.t. correctieve acties geldt:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 1 - \frac{MTTR}{MTBF}$$

waarin geldt $MTTR \ll MTBF$

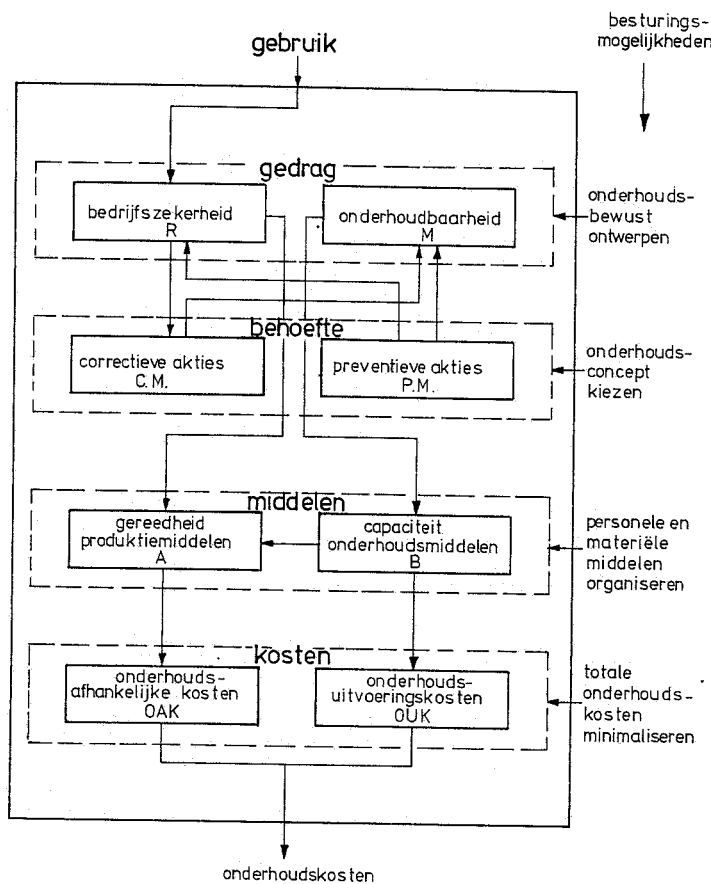


Fig 2: sterk vereenvoudigd schema van het onderhoudsproces

al dan niet meetelt, enz. Veel gebruikt wordt de gemiddelde reparatieduur, de MTTR-waarde (mean time to repair). Hierbij moet dan wel worden opgemerkt,

Bij vele technische systemen (denk bijv. aan continubedrijven) is de gereedheid een belangrijk kwaliteitskenmerk. Uit de formule blijkt dat een hogere waarde van A zowel door een grotere MTBF als een kleinere MTTR kan worden bereikt, zodat afweging van deze mogelijkheden door de

ontwerper noodzakelijk kan zijn. Hij kan bijv. kiezen voor een component met relatief lage R die snel te vervangen is.

Het onderhoudsproces

Figuur 2, dat van boven naar beneden moet worden gelezen, geeft een sterk vereenvoudigd schema van het onderhoudsproces.

Het gebruik van een technisch systeem met bepaalde productie-capaciteit

– veroorzaakt een zeker *onderhoudsge*

drag, gekarakteriseerd door de bedrijfszekerheid R en de onderhoudbaarheid M

– roept een *onderhoudsbehoefte* op waarbij vrijwillige, preventieve en gedwongen correctieve acties zijn te onderscheiden

– vergt inzet van *onderhoudsmiddelen* met bepaalde capaciteit, te denken aan mankracht, materiële middelen en procedures

– resulteert in een bepaalde *gereedheid A* omdat de onderhoudsacties ten dele met stopstand gepaard gaan

– leidt tot *onderhoudsuitvoeringskosten* en tot *onderhoudsafhangelijke kosten* (uitvalkosten), samen de *onderhoudskosten*.

Ten einde de onderhoudskosten te minimaliseren kunnen de besturingsmogelijkheden, aangegeven in de rechterkant van de figuur, worden benut. Bij het ontwerpen

van nieuwe installaties is het nog mogelijk rekening te houden met onderhoudsaspec

ten, o.a. via de keuze van vorm, afmetingen en materiaal van onderdelen. De ontwerper dient zich daarbij wel af te vragen

in hoeverre hij zijn doel voordeliger kan bereiken met de andere mogelijkheden: aanpassing van het onderhoudsconcept

en/of de onderhoudsmiddelen. R kan bijv. worden verhoogd door een ander materiaal

te kiezen, maar ook door meer preventief onderhoud uit te voeren; een verhoging van M kan worden bereikt door toepassen

van gestandaardiseerde componenten, maar ook door inzetten van gespecialiseerd personeel. De ontwerper moet voor deze

afweging a.h.w. het onderhoudssysteem bij het ontwerp van het technisch systeem betrekken en dus inzicht hebben in de

midelen waarmee en de wijze waarop onderhoud zal worden uitgevoerd. Een logisch gevolg is dat hij onderhoudsvoorschriften met goed- en afkeurmaten, reparatiemethoden, benodigde reservedelen, enz. tot zijn ontwerp behoort te rekenen.

Het ontwerpproces

• Ontwerpfasen

Ontwerpen is een fase uit de levensloop van een produkt, die begint met het aanvullen en harmoniseren van het aanvankelijk vage en onevenwichtige pakket van eisen.

Uitgaande van een abstracte vraagstelling in woorden, leidt ontwerpen in een aantal fasen tot concretisering, meestal in de vorm van een pakket tekeningen. Men kan het *concretiseringsproces* arbitrair in drie fasen verdelen, waarin verschillende eisen

ontwerpen is een fase uit de levensloop van een produkt, die begint met het aanvullen en harmoniseren van het aanvankelijk vage en onevenwichtige pakket van eisen.

Uitgaande van een abstracte vraagstelling in woorden, leidt ontwerpen in een aantal fasen tot concretisering, meestal in de vorm van een pakket tekeningen. Men kan het *concretiseringsproces* arbitrair in drie fasen verdelen, waarin verschillende eisen

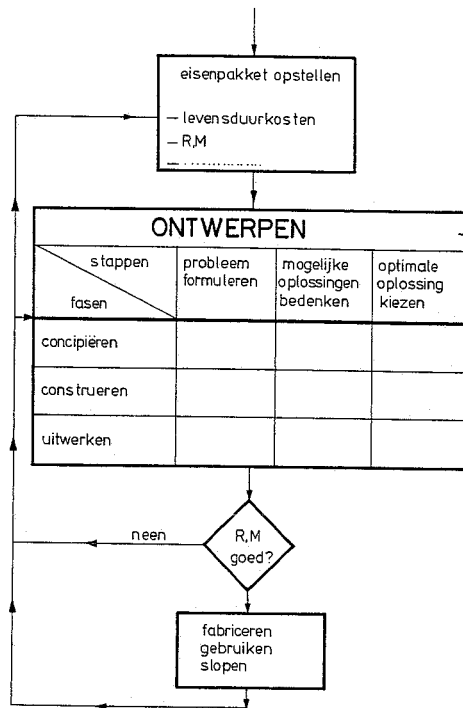


Fig 3: schematische weergave van het ontwerpproces

en systeemkenmerken centraal staan (figuur 3 verticaal):

– *conciëren* dat leidt tot het concept of voorontwerp, de hoofdfunctie is primair uitgangspunt, gekozen wordt o.a. de werkwijze

– *construeren* dat leidt tot het ontwerp, de gevraagde prestatie staat centraal, gekozen worden o.a. de hoofdafmetingen

– *uitwerken* of detailleren; dit is een herhaling van de eerste twee fasen, maar nu voor de deelfuncties binnen het systeem. Alle eisen worden verwerkt, o.a. fabricage-eisen.

De constructieve keuzen in alle drie concretiseringsfasen hebben vergaande consequenties voor het onderhoudsgebeuren later. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan een compressorinstallatie. De keuze namelijk van de werkwijze bijv. tussen schroef- en zuigercompressoren, werkt door tot in alle componenten van de constructie, bijv. in de vorm van kwetsbare (R) en moeilijk te herstellen (M) afdichtingen. De gekozen bouwwijze (horizontaal of verticaal) kan sterke invloed hebben op de demonteerbaarheid (M) bij revisies. Een toepassing van hoogwaardige materialen kan R verhogen, maar M verlagen wegens problemen bij reparatie; een getrapte as kan lagerverwisseling vergemakkelijken (M), maar aanleiding geven tot breuk (R).

• Ontwerpstappen

In elke concretiseringsfase moet voor het probleem een aantal mogelijke oplossingen worden bedacht teneinde daaruit de optimale oplossing te kiezen. De daartoe beno-

digde stappen zijn in figuur 3 horizontaal gegeven:

– *probleem formuleren* (analyse): de vraagstelling wordt gestructureerd en getracht wordt te komen tot modelvorming:

– *oplossingen bedenken* (synthese): op basis van het model wordt gezocht naar de verzameling van mogelijke oplossingen:

– *optimale oplossing kiezen* (selectie): uit de mogelijke oplossingen wordt de beste gekozen met o.a. het eisenpakket als maatstaf.

De drie ontwerpfasen verticaal en de drie oplossingsstappen horizontaal beschrijven het totale probleemveld waarmee de ontwerper zich ziet geconfronteerd. Deze velden worden volgens een grillige weg betreden. Veelal blijkt een aanvankelijk ingeslagen weg achteraf dood te lopen en moet men weer terug om een andere weg te kiezen. Het ontwerpen is een *iteratief beslissingsproces*. De oorzaken van deze iteraties moet o.a. worden gezocht in gebrek aan informatie – vaak in de hand gewerkt door gebrek aan tijd en geld – waardoor consequenties van een bepaalde keuze pas later in het proces zichtbaar worden. Ontwerpen is ook te zien als *leerproces*: men leert nl. van zijn fouten hoe het niet moet.

Er zijn fouten die pas later tijdens het gebruik van het systeem tot uiting (kunnen) komen. Slechts door *terugkoppeling* vanuit de praktijk kan worden voorkomen, dat de ontwerper daar niets van leert, maar in herhaling valt.

Oorzaken van en remedies tegen onderhoudsvijandige constructies

In de praktijk blijkt vaak achteraf dat R en/of M van een ontwerp ongewenst laag zijn uitgevallen; iedereen kent bijv. wel werktuigen die voor hetzelfde geld beter zouden kunnen worden gesmeerd. Blijkbaar is aan onderhoudsaspecten niet op de juiste wijze aandacht besteed tijdens het ontwerpen. Er zou al veel bereikt zijn indien men bij elk ontwerp zou trachten de volgende vragen te beantwoorden:

– wat zijn de componenten die het meest aantal malen onderhoud vergen?

– welke onderhoudsacties zijn dan nodig?

– hoeveel tijd gaan die kosten? en omgekeerd:

– welke componenten vragen bij onderhoudsacties de meeste tijd?

– wat moet er dan gebeuren?

– hoe vaak komt dat voor?, teneinde uit de antwoorden af te leiden welke punten uit onderhoudsoogpunt extra aandacht verdienen. In het volgende zal dan ook worden nagegaan hoe in de opeenvolgende fasen en stappen van het ontwerpproces systematisch aandacht kan worden besteed aan onderhoudsaspecten

• Het opstellen van het eisenpakket

Het eisenpakket is in feite een opsomming van deels tegenstrijdige eisen, wensen en

levensfasen		aspectsystemen van de omgeving					
		operand	technisch	sociaal	economisch	commercieel	maatschappelijk
ontwerpen		produktstroom	andere werktuigen	mens	bedrijf	markt	maatschappelijk samenleving
fabriceren incl. monteren							
transporteren							
opslaan							
gebruiken	bedienen						
	onderhouden						
	aanpassen						
afdanke (incl. slopen)							

Fig 4: schematische weergave van het opstellen van het eisenpakket

randvoorwaarden. Het ontwerp is een compromis, doorgaans bereikt nadat tijdens het ontwerpen een aantal verlangens zijn afgezwakt of zelfs geschrapt. Ook het formuleren van het eisenpakket is een iteratief proces! In deze situatie zullen aspecten, die niet expliciet in het eisenpakket worden opgenomen, bij de keuze van de optimale oplossing in feite als sluitpost fungeren. Eisen t.a.v. *R*, *M* en eventueel *A*, al is het noodgedwongen kwalitatief, behoren dan ook deel uit te maken van het eisenpakket in de vorm van een onderhoudsspecificatie. Uiteraard staan voorop de functionele eisen waaraan het systeem tijdens normaal bedrijf moet voldoen. Uit een oogpunt van falen zijn echter abnormale belastingssituaties, zoals die kunnen optreden als gevolg van starten en stoppen, afwijken in de produktstroom, bedieningsfouten e.d., evenzeer van belang. Een goede systematiek lijkt het beste middel om bij de inventarisatie volledigheid te benaderen. Dit kan gebeuren door stelselmatig de *wisselwerking* na te gaan van het technisch systeem met zijn omgeving gedurende zijn opeenvolgende levensfasen, van fabriceren tot en afdanken (fig 4). Ook de omgeving kan in aspecten worden opgesplitst, waarvan bijv. de mens er één is. Onderhoudbaarheidseisen ontstaan dan o.a. als resultaat van de wisselwerking van het werktuig en de mens tijdens verschillende onderhoudsacties, bijv. demonteren.

• Probleem formuleren

Een probleemformulering mondt uit in een *modelvorming* met het doel de voornaamste parameters van mogelijke oplossingen op te sporen en zo mogelijk kwantitatief met elkaar in verband te brengen. Het object van deze modelvorming is de combinatie van het technisch systeem en het bijbehorende onderhoudssysteem (fig 5). Zij kunnen elk worden gesplitst in deel- en aspectsystemen op verschillende niveaus

waartussen relaties kunnen worden gedacht, o.a. van natuurkundige, logische en mathematische aard. Binnen het technische systeem kunnen bijv. werktuigkundige componenten worden onderscheiden, binnen het onderhoudssysteem de mens, materiële middelen en procedures. Bij het ontwerpen wordt vastgesteld hoe de systemen moeten zijn opgebouwd om invloeden vanuit de omgeving (invoer) te beantwoorden met een bepaald gedrag (uitvoer), dat wederom de omgeving beïnvloedt. Het ontwerpen van het technische systeem is primair de opdracht van de werktuigbouwer, het bedenken van het onderhoudssysteem in eerste aanleg een bedrijfskundige taak. De relaties tussen beide systemen geven aan, dat bij het ontwerpen van het ene systeem rekening moet worden gehouden met randvoorwaarden of nog te kiezen parameters van het andere systeem. Onderhoudsgereedschap bijvoorbeeld kan een randvoorwaarde vormen (standaarduitrusting), maar ook een deel van het ontwerp uitmaken.

Bedrijfszekerheid

Bij het dimensioneren van een technisch systeem, d.w.z. het aanpassen van afmetingen en materiaal aan de gegeven belasting en het gewenste gedrag – waarvan falen een aspect is – wordt het model van figuur 5 als volgt doorlopen:

- de uitwendige belasting op het systeem als geheel wordt gesplitst in
- de belasting op de deelsystemen die, vergeleken met
- de belastbaarheid van de deelsystemen gegevens oplevert voor
- het gedrag van de deelsystemen en, samengesteld
- het gedrag van het systeem als geheel.

Het gedrag onder belasting van de kleinste in beschouwing te nemen deelsystemen

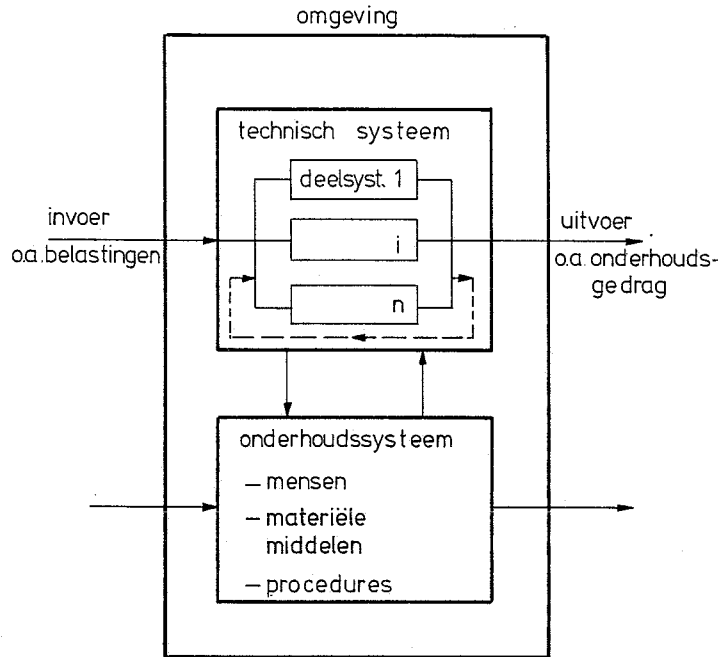


Fig 5: model van het technische systeem en het bijbehorende onderhoudssysteem

moet dus bekend zijn. Een complicatie is dat deze gedragingen bij andere deelsystemen additionele belastingen kunnen oproepen (terugkoppeling), afhankelijk van de materiële oplossingen die worden gekozen. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het optreden van resonanties. Een dergelijke procedure leidt bij de berekening tot iteraties.

In beginsel kan men als kleinste deelsysteem voor een dergelijke berekening *elementaire volume- en oppervlakte-deeltjes* kiezen en uitgaan van experimentele gegevens over hun gedrag onder invloed van een enkelvoudig faalmachanisme (bijv. slijtage) onder nauwkeurig omschreven *laboratoriumcondities*. Deze aanpak schept in de werktuigbouwkunde grote problemen vanwege:

- de grote variëteit in belastingsoorten (mechanisch, thermisch, chemisch, enz.) en het feit dat deze vaak gecombineerd optreden
 - de toerekening van de uitwendige systeem-belasting aan een dergelijk element, en – omgekeerd – de bepaling van de invloed van het gedrag van een element op het systeemgedrag, is een lange en moeilijke weg die slechts dank zij vergaande styleringen kan worden afgelegd en waarop de nauwkeurigheid van de uitgangsgegevens grotendeels verloren kan gaan.
- Bovenstaande moeilijkheden zijn grotendeels te omzeilen door één of meer *prototypen* van het systeem als geheel te testen, wat echter meestal slechts verantwoord is bij grote series. De resultaten zeggen meer naarmate de gebruikscondities dichter kunnen worden benaderd, waarbij resultaten uit de *praktijk* het beste zijn. Het kan echter vaak te lang duren voor deze beschik-

baar zijn. Een middenweg tussen deze beide uitersten wordt verkregen door als kleinste deelsystemen *componenten* te kiezen, zoals lagers, pompen, tandwielkasten, veiligheidstoestellen, vaten e.d. en daarvan gegevens te verzamelen in de *praktijk*. Dergelijke componenten komen in vele verschillende werktuigkundige systemen voor, het leggen van de relaties naar een systeem als geheel is minder ingewikkeld; een hulpmiddel daarbij is o.a. de foutenboomanalyse.

Hoewel onderzoek aan prototypen steeds een plaats zal behouden en wij zeker door moeten gaan met onderzoek aan elementen, lijkt het gewenst voor het onderzoek aan componenten onder praktijkcondities meer plaats in te ruimen. In eerste aanleg zou kunnen worden onderzocht of vanuit een globale classificatie van de gebruikscondities kan worden gekomen tot een globale indicatie van het onderhoudsgedrag.

Deze inventarisatie start dus in de praktijk, later kan getracht worden de resultaten te koppelen aan die van laboratoriumonderzoek bij elementen.

Onderhoudbaarheid

Ook onderhoudbaarheid kan worden opgevat als een gedragsaspect van een technisch systeem: het karakteriseert de wijze waarop het systeem reageert bij interactie met het onderhoudssysteem. De vraag is nu: welke kenmerken van beide systemen moeten worden gekozen om deze wisselwerking adequaat te beschrijven?

Het onderhoudssysteem is opgebouwd uit de deelsystemen mens, materiële middelen (o.a. uitrusting, reservedelen en hulpstoffen) en procedures (o.a. goed- en afkeurregels, onderhoudsconcepten). Wat de mens betreft ligt het voor de hand uit te gaan van zijn eigenschappen voorzover die bepalend zijn voor het functioneren in de verschillende stadia van een onderhoudskarwei: lokaliseren, demonteren, schoonmaken, vervangen of repareren, monteren en proefdraaien. In het algemeen zijn naast de noodzakelijke fysiologische levensverrichtingen (ademen, stofwisseling, enz.), als deelfuncties te onderscheiden: waarnemen, denken en bewegen. Hiermee corresponderend kunnen – arbitrair – als relevante eigenschappen van het technische systeem worden gekozen (fig 6): werkomstandigheden, waarneembaarheid, inzichtelijkheid, bereikbaarheid, hanteerbaarheid, losneembaarheid, bewerkbaarheid, instelbaarheid en reinigbaarheid. Ook uit de wisselwerking met de materiële middelen zijn eigenschappen van het technisch systeem af te leiden, bijv. het maximale gewicht van te hijsen delen, evenals uit te volgen procedures, zoals conditiebewaking en veiligheidsvoorschriften.

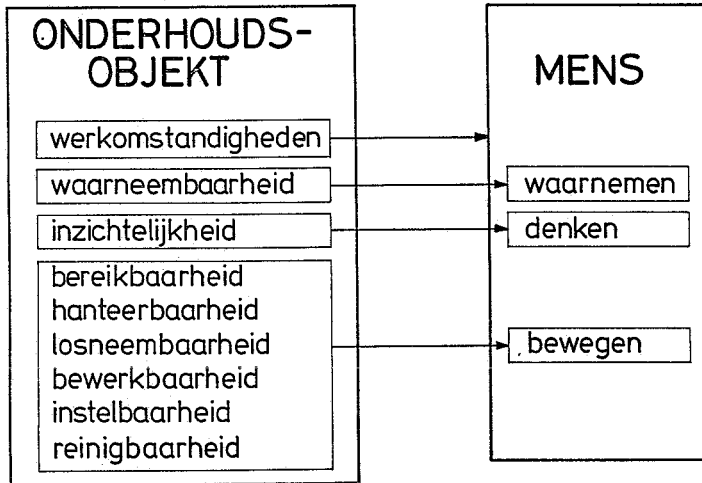


Fig 6: model van de onderhoudbaarheid van een technisch systeem

Het is niet goed mogelijk ook de onderhoudbaarheid van een complex systeem af te leiden uit de onderhoudbaarheid van zijn componenten. Het kenmerk 'bereikbaarheid' bijvoorbeeld heeft op componentniveau geen betekenis, maar slechts op systeemniveau. Beperken wij ons tot het onderhoudbaarheidsaspect 'tijdsduur', dan kan de bepaling van *M* van een systeem als volgt geschieden:

- inventariseer de onderhoudskarweien
- bepaal de uitvoeringsduur van de karweien en houd daarbij rekening met bovengenoemde onderhoudbaarheidseigenschappen. Aansluiting kan worden gezocht bij bestaande schattingssystemen uit de arbeidstechniek (o.a. gebruik van ijkkarweien)
- bepaal de frequentie van optreden van de onderhoudsacties
- bepaal de gemiddelde onderhoudstijd.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat ook voor de bepaling van de *M*-waarde van een complex systeem de *R*-waarde van de componenten bekend moet zijn. Overigens kan het ook terwille van het bereiken van een goede onderhoudbaarheid verantwoord zijn een prototype te bouwen en te testen.

• Mogelijke oplossingen bedenken

Het bedenken van mogelijke oplossingen is een zeer essentiële stap, waarvoor een groot aantal methoden ter beschikking staat zowel van intuïtie als rationele aard. Het dient zó te geschieden dat de kans groot is dat de optimale oplossing erbij is, ook t.a.v. onderhoudsaspecten. Uiteraard is de vakbekwaamheid van de ontwerper hierbij doorslaggevend waartoe zeker óók de kennis behoort van methoden en deeloplossingen om langs constructieve weg *R* en/of *M* te bevorderen door een goede keuze van werkwijzen, vormen, afmetingen en materialen. Zonder pretentie van volledigheid volgen enkele maatregelen die *R* en *M* kunnen bevorderen.

Verhogen van *R* en *M*

- Constructie vereenvoudigen. Bij de Amerikanen staat dit bekend als het *kiss*-concept (Keep It Simple Stupid). Te denken is aan het beperken van het aantal nevenfuncties en van het aantal onderdelen om de resterende deelfuncties te vervullen. Een groot aantal onderdelen kan een ongunstige invloed op *R* hebben: het merendeel staat in serie, zoals de schakels van een ketting. Elk onderdeel dat er niet is heeft a.h.w. een ideale *R*- en *M*-waarde.
- Modulaire opbouw kiezen. Moduulbouw, oorspronkelijk ontstaan om fabricagekosten te drukken door uniforme uitvoering van terugkerende deelfuncties, kan voordelen hebben uit onderhoudsoogpunt. Men kan met minder verschillende onderdelen volstaan die men elk beter kan optimaliseren en die snel te verwisselen zijn. In het verlengde liggen voordelen als gevolg van normalisatie en standaardisatie van componenten, materialen, hulpstoffen e.d. De mogelijkheid tot vergissingen neemt af mits de aansluitvlakken van modules met afwijkende functies onderling verschillen.
- Rationaliseer preventief onderhoud. Vermindering of eliminatie van preventieve onderhoudsacties (zonder toeneming van correctieve) vermindert o.a. sleutel- en afstelfouten (op levensduur gesmeerde lagers). Wat overblijft eventueel centraliseren (bijv. smeerinstallatie) of automatiseren (bijv. zelf-nastellende remmen).
- Beperk gevolgschade. Voorkom dat het ene defect het andere oproept, bijv. bij lekkages of warmte-ontwikkeling. Beveiligingen tegen overbelasting (slipkoppeling) of abnormale belastingsoorten (afschermingen) zijn te overwegen.

Om te beginnen wordt de veiligheid beheerscht door de constructie. Eenvoud is ook hier het kenmerk van het ware, daar een eenvoudige, overzichtelijke constructie gemakkelijk te controleren is en dus beschadigingen onmiddellijk geconstateerd kunnen worden, zodat de kans op ongevallen tot een minimum gereduceerd blijft.
A. Viruly in: 'Wij vlogen naar Indië' (1933)

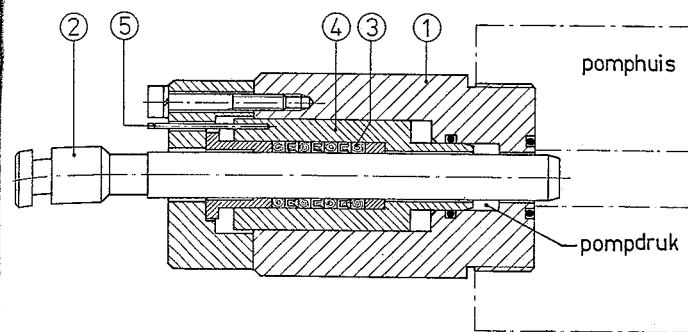


Fig 7: constructiemodel, waarbij zowel rekening is gehouden met de bedrijfszekerheid (R) als met de onderhoudbaarheid (M)

– Verbeter conditiebewaking. Bewaking d.m.v. een signaleringssysteem dat procescondities en/of relevante gedragsindicaties (bijv. lagertrillingen) (semi)continu meet kan R en/of M gunstig beïnvloeden: falen wordt voorkomen, zij het ten koste van preventieve acties, en de lokalisatie van defecten kan sneller verlopen. Overigens dient R van een signaleringssysteem, evenals van een beveiligingssysteem, i.h.a. aanzienlijk hoger te liggen dan die van het te bewaken object.

Een aardig voorbeeld van een constructie die uit onderhoudsoogpunt aantrekkelijk is toont figuur 7. Tegen het pomphuis is de cilinder (1) gemonteerd, die de plunjer (2) moet geleiden en afdichten. Merk op: het geheel is een voorbeeld van modulaire bouwwijze (snel te vervangen); de pakking (3) wordt aangedrukt door bus (4) met een kracht die evenredig is aan de momentane druk in het pomphuis (levensduur langer); de pakking wordt automatisch nagesteld door de bus; pen (5) geeft aan wanneer de pakking moet worden vernieuwd.

Verhogen van R

Hierbij kan worden overwogen (zie ook figuur 5):

– Uitwendige belastingen op het systeem te elimineren, te verlagen of beter te verdelen. Veel defecten zijn het gevolg van uitwendige belastingen die bij het ontwerp niet zijn voorzien. Na ontsporing kan men trachten deze te elimineren met beveiligingsinrichtingen (bijv. full-proof constructie tegen bedieningsfouten), te verlagen (bijv. met trillingsdempers) of beter te verdelen (bijv. gelijkmatiger slijtage). De manier waarop een systeem door zijn vormgeving uitwendige belasting kan oproepen toont figuur 8a: in het profiel blijft regenwater staan, tenzij er een gat in wordt gemaakt of het wordt omgekeerd.

– Bedrijfszekerder structuur kiezen. Onder structuur in dit verband te verstaan: het geheel van de interne relaties binnen het systeem, o.a. de doorleiding van uitwendige invloeden naar de componenten en omgekeerd, alsmede de relaties tussen de componenten onderling. T.a.v. inwendige

belastingen valt te denken aan de bovengenoemde maatregelen, elimineren, verlagen of beter verdelen (zie figuur 8b en 8c).

Een andere mogelijkheid is toepassing van redundatie (overtaligheid) waarbij één of meer additionele componenten de taak van een gefaalde component kunnen overnemen. Redundantie komt niet alleen in de elektrotechniek, maar ook in de werktuigbouwkunde veel voor, o.a. bij besturingssystemen en centrale voorzieningen. De bereikte verhoging van R hangt er mede vanaf hoe snel het inspectiesysteem een defect constateert. Figuur 8d toont redundantie bij de elektriciteitsvoorziening: als de netspanning wegvalt, valt de elektromagnetische koppeling in en wordt de dieselmotor gestart.

– Bedrijfszekerder componenten kiezen. Gebruik zo mogelijk geproefde onderdelen. Hierbij kan worden gedacht aan het verhogen van de belastbaarheid door de keuze van werkwijzen, vormen, afmetingen en materialen, ten einde de voornaamste oorzaken van falen zoals: plastische vervorming, breuk, slijtage en corrosie tegen te gaan. Hierbij valt niet alleen te denken aan het vermijden van overbekende fouten waartegen nog steeds wordt gezondigd (scherpe afrondingen bijvoorbeeld), maar ook aan het toepassen van nieuwe technieken (bijv. oplassen met slijtvaste lagen, een werkwijze die overigens uit het

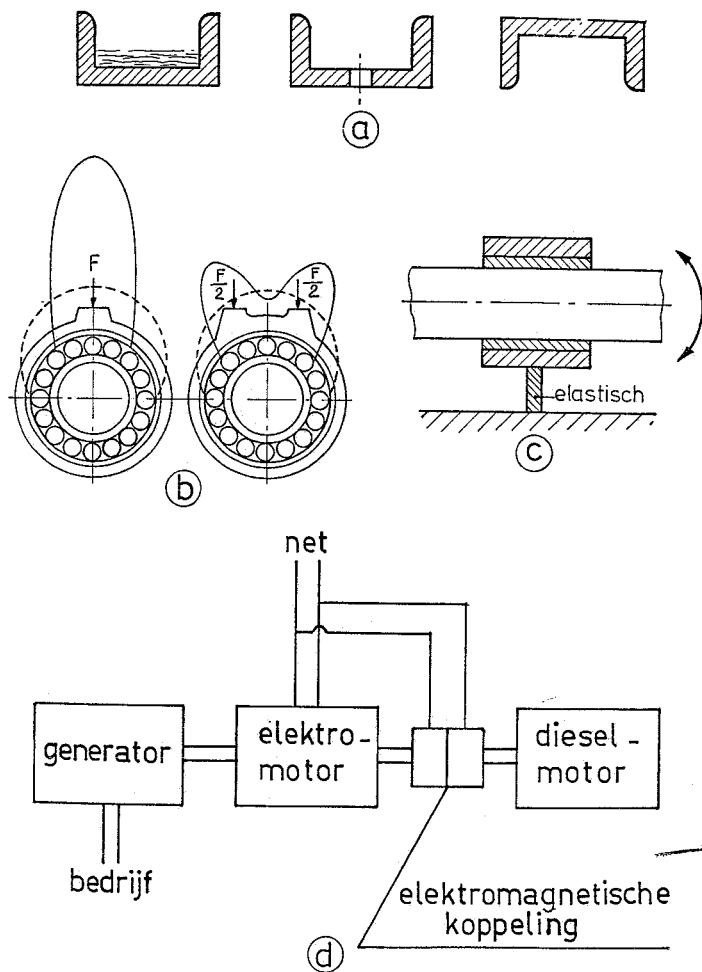


Fig 8: voorbeelden van een constructiemodel, model, waarbij rekening is gehouden met de bedrijfszekerheid (R)

onderhoud stamt), aan gebruik van nieuwe materialen (bijv. kunststoffen als lagermateriaal) en aan het toepassen van andere fysische principes en werkwijzen.

Verhogen van M

Hierbij kunnen verbeteringen worden overwogen t.a.v. (zie ook fig 6):

– werkomstandigheden, waaronder ook de veiligheid is te rekenen. Te denken is o.a. aan stank en vuil, langdurig boven het hoofd, gehurkt of liggend werken, scherpe randen, gladde vloeren, enz.

– waarneembaarheid van (een samenstel van) componenten. Te denken is o.a. aan een onbelemmerd blikveld, hulpmiddelen zoals peilstokken, voldoende licht, kijk- en peilgaten, enz.

– inzichtelijkheid van het systeem. Te denken is o.a. aan een eenvoudige, logische opbouw, aanwezigheid van opschriften en schema's, coderingen met kleur, enz.

– bereikbaarheid van componenten. Te denken is o.a. aan ruimte voor uitbouwen, hanteren van gereedschap, toegangsluiken, bordessen, ladders. Bedenken dat werkhogtes, reikwijdtes, openingen, enz. aangepast moeten zijn aan de menselijke anatomie

– hanteerbaarheid van het systeem en zijn componenten. Te denken is aan gewichts- en vormbeperkingen, mogelijkheid tot aanpakken, verplaatsen en tillen, gebruik van sledes, hijsogen, enz.

– losneembaarheid van verbindingen. Te denken is aan beperking van het aantal verbindingsmiddelen, vermijden van tapbouten, gebruik van knevels, kwartslag-schroeven, enz.

– instelbaarheid. Te denken is aan positioneren, justeren en uitlijnen, enz., te vereenvoudigen door merktekens, aanslagen, paspennen, zoekranden e.d.

– bewerkbaarheid. Te denken is aan de mogelijkheid tot repareren d.m.v. lassen, opzuiveren, vlakken, opboren, verbussen, enz.

– reinigbaarheid. Te denken is aan de mogelijkheid tot schoonmaken (hoeken, gaten, spleten, oppervlakteruwheid, aard van het materiaal).

Veel gegevens zijn te vinden in ergonomische publikaties, zie bijv. figuur 9. Een eenvoudig voorbeeld van een constructie waarin een aantal van bovengenoemde factoren tot hun recht komt toont figuur 10.

De as (1) met het tandwiel (2) en de kegellagers (3) en (4) in het huis (5) vormen een moduul waarbij afstellen, na uitwisselen niet nodig is. Moeten de lagers van het moduul worden vervangen, dan vergt instellen van de voorspanning weinig tijd: het meermalen monteren en demonteren bij het zoeken van een passende afstandsring is vermeden door toepassing van de elastische afstandsbus (6) die met de moer (7) wordt ingedrukt. De as is getrappt uitgevoerd, zodat kegellager (3) (vaste passing op de binnenring) niet over de volle lengte van de as hoeft te worden getrokken. Waar nuttig, zijn zoekranden aangebracht.

Keuze van de optimale oplossing

Elk ontwerp is een compromis. Door nog meer en betere middelen te gebruiken, bijv. door betere materialen te kiezen, kan men de functie vervulling – in ruime zin genomen – verbeteren. Maar men schiet zijn doel voorbij als zodoende de extra baten de additionele lasten niet meer overtreffen. Dit geldt ook voor maatregelen ter verbetering van R en/of M .

De keuze van de optimale oplossing dient, uit onderhoudsoogpunt, in beginsel te worden gebaseerd op levensduurkosten als criterium. In figuur 11 ligt bij A een optimum, waarbij de som van de aandelen aanschaffen en gebruikskosten minimaal is. Kiest men dit optimum niet, bijvoorbeeld omdat de kostprijs wordt begrensd, dan is de kans groot, dat een oplossing wordt verkregen, die tijdens gebruik niet blijkt te voldoen qua onderhoudsgedrag. Een voorbeeld zijn de uitlaten van vele autos' (B). In een bedrijf ziet men dan vaak dat vooraf be-

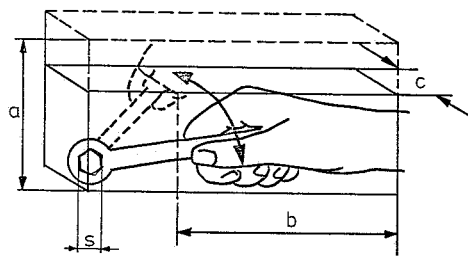


Fig 9: voorbeeld hoe rekening kan worden gehouden met de bereikbaarheid van bepaalde onderdelen opdat de onderhoudsbaarheid (M) kan worden verhoogd

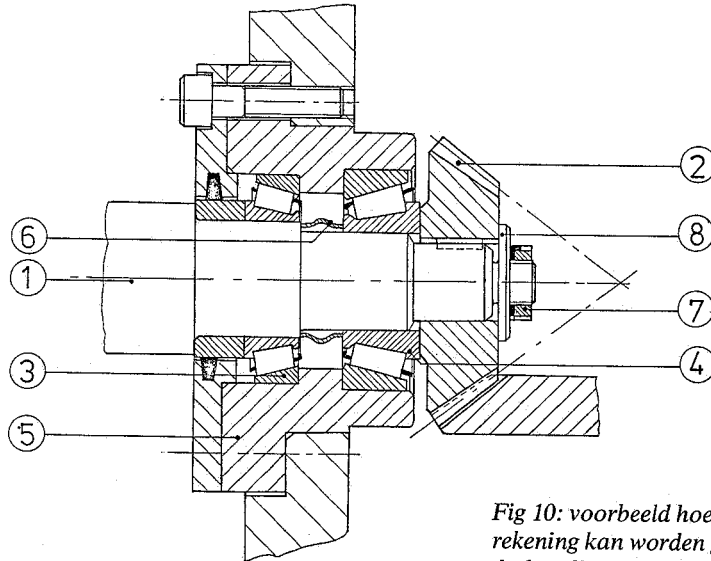
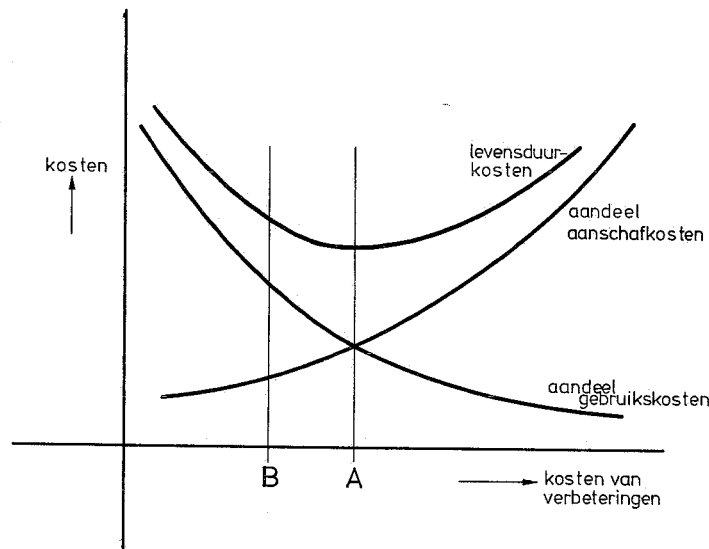


Fig 10: voorbeeld hoe bij de constructie rekening kan worden gehouden met de onderhoudsbaarheid (M)



kende zwakke punten alsnog achteraf worden verbeterd met (meer) geld uit een andere pot.

De keuze van de optimale oplossing wordt bemoeilijkt doordat de relevante factoren niet alle op één noemer zijn te brengen, i.c. geld. Als bijvoorbeeld de onderhoudsbaarheid kan worden verbeterd door modulaire bouw, zijn de extra bewerkingskosten van de aansluitvlakken gemakkelijk te berekenen, maar de baten niet. De ligging van het optimum is in werkelijkheid moeilijk of niet vast te stellen. Bovendien is het een sub-optimum; vele andere concurrerende maatregelen leiden ook tot verbeteringen en aan welke moet nu prioriteit worden geven? En hoe moeten onderhoudsaspec-

ten worden ingeschaald t.o.v. andere aspecten zoals levensduur, veiligheid, milieubelasting, grondstoffen- en energieverbruik, enz., die zowel kunnen ondersteunen als tegenwerken? Het lijkt bijvoorbeeld niet verstandig om bij installaties met een lange levensduur wegwerponderdelen toe te passen uit schaars wordende grondstoffen.

De moeilijkheid, dat op grond van in wezen onvergelykbare factoren toch moet worden beslist, is kenmerkend voor vrijwel elk

ontwerp. Ook in dit geval is zoveel mogelijk systematisch werken geboden. De methode Kesselring waardeert enerzijds technische aspecten van het systeem en anderzijds economische mérites (fig 12). Onderhoudsaspecten kunnen langs beide assen tot uitdrukking komen. Naarmate een oplossing meer rechts boven ligt, is hij aantrekkelijker. Het vaststellen van de beide scores voor elke oplossing gebeurt via waardering van deelaspecten, voorzover op absolute en kwantitatieve overwegingen (bijv. calculeerbare besparingen), maar als dat niet lukt ook op relatieve en kwalitatieve gronden. Het lijkt mogelijk en gewenst voor dit doel beoordelingslijsten (check-lists) te ontwerpen, die in algemene termen zijn gesteld voor willekeurige werktuigkundige systemen en meer specifiek zijn geformuleerd voor bepaalde soorten werktuigen. De eerdergenoemde werkgroep 'Onderhoud en Ontwerp' van het NVDO is doende concepten voor dergelijke lijsten op te stellen in de hoop dat zij later m.b.v. de industrie kunnen worden vervolmaakt.

Het bezwaar van de methode Kesselring, en van daaraan verwante methoden, is dat men belangrijke aspecten over het hoofd kan zien en/of tot eenzijdige beoordeling komt bijvoorbeeld door naar een bepaalde oplossing toe te werken. De ontwerper kan dit tegengaan door overleg met anderen die vanuit hun ervaring tot evenwichtige oordeelsvorming kunnen bijdragen, zoals de opdrachtgever, inkoop, verkoop, servicedienst, enz. met als bijkomend voordeel dat die reeds in het ontwerp stadium worden geconfronteerd met de consequenties van hun eisen bijv. t.a.v. prijs en levertijd. Nu weet iedere praktijkman dat aan deze samenwerking, ook een vorm van terugkoppeling, vaak veel mankeert. Genoemde beoordelingslijsten zouden hierin verbetering kunnen brengen door te dienen als objectieve basis voor een dergelijk overleg.

Benodigde kennis en vaardigheden

Het arsenaal waarover de onderhoudsbewuste ontwerper van werktuigen moet beschikken omvat uiteraard algemene kennis en vaardigheden omtrent de basisvakken van de werktuigbouwkunde: wiskunde, natuurkunde, materiaalkunde, vervaardigingskunde en ontwerp-kunde (methoden voor analyse, synthese en selectie; werktuigonderdelen).

De specifieke kennis die daarnaast nodig is betreft:

- aanvullende en verdiepende hoofdstukken uit de basisvakken
 - afhankelijk van de aard van de systemen bijv. te denken aan stromingsleer, materiaalkeuze e.d.
 - breuk, slijtage, corrosie, enz. (faaloorzaken)

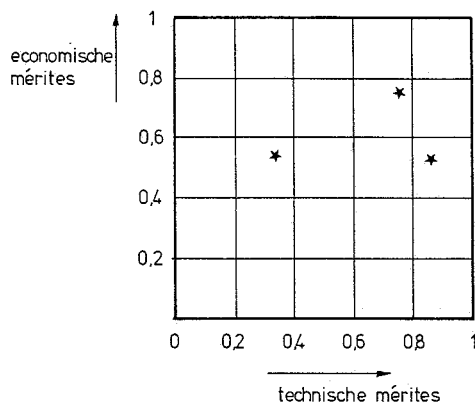


Fig 12: keuze volgens Kesselring, een systematische methode om tot een optimaal ontwerp te komen. Zowel economische als technische aspecten worden hierbij in rekening gebracht

- statistiek, kwaliteitsbeheersing, enz.
 - de werking van de systemen in kwestie bijv. verbrandingsmotoren
 - onderhoudsuitvoering
 - onderhoudsconcepten, technieken voor conditiebewaking, reparatietechnieken, enz.
 - methoden voor bepaling van R en M
 - foutenboomanalyse, failure mode and effect analysis (fmea), enz.
 - ergonomie, ijkkarweien, enz.
 - constructieve richtlijnen ter beïnvloeding van R , M en A
 - verwante problematiek
 - levensduur, veiligheid, risico, milieu, grondstoffenschaarste, enz.
 - ontwerpfilosofie
 - optimalisering op basis van levensduurkosten, terugkoppeling, enz.
- Uit deze opsomming kan een programma worden afgeleid voor specialisatie t.a.v. onderhoudsaspecten binnen een werktuigkundige studierichting. Daarin moet ook ruime aandacht worden besteed aan de vaardigheden van communiceren en samenwerken.

Besluit

In dit artikel is getracht het probleemveld van het onderhoudsbewust ontwerpen af te bakenen en een aantal aspecten ervan te bezien in hun onderlinge samenhang. De gebruikte begrippen, zoals bedrijfszekerheid, onderhoudbaarheid, levensduurkosten e.d. zijn niet nieuw, ontwerpen is nl. een oud vak. Als er sprake is van nieuwheid, dan betreft dit de afwijkende accenten, de bijzondere relaties die zijn gelegd door het ontwerpen primair vanuit onderhoudsoogpunt te bezien. De belangstelling voor deze invalshoek vindt haar rechtvaardiging in de verschuivingen, die hebben plaatsgevonden zowel in de technische systemen zelf - door schaalvergroting en toegenomen complexiteit - als in de veranderde omstandigheden waaronder zij moeten opereren, waarbij valt te denken aan aspecten als economische teruggang, langere levensduren, grotere veiligheid, lagere milieubelasting en aan een geringer verbruik van schaarse grondstoffen en energie.

