

Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt

Citation for published version (APA):

Hankmann, W. (1986). Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt. In *Bedrijfszekerheid en onderhoud in ziekenhuizen* / Ed. R.P. van Wijk van Brievingh, J. van Dam (blz. 75-93). (Bedrijfszekerheid en onderhoud in ziekenhuizen / Ed. R.P. van Wijk van Brievingh, J. van Dam, 1986). Delftse Universitaire Pers.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1986

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.

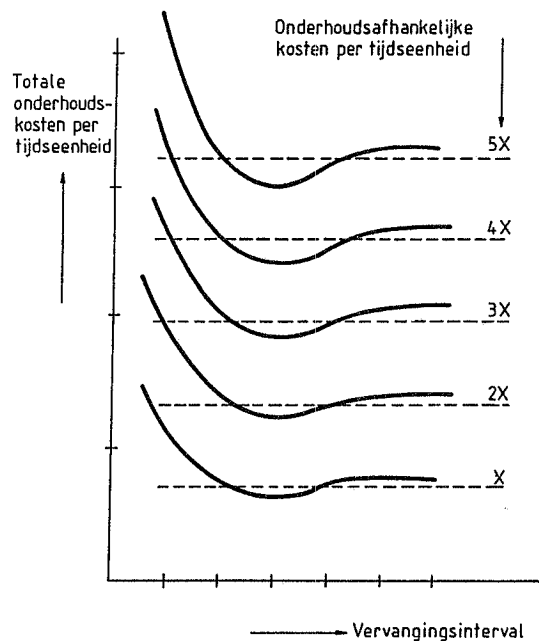


fig. 9 Invloed vervangingsinterval op onderhoudskosten

Literatuur

- [1] Mooren, A.L. van der, Evaluatie in de ontwerpfase van werktuigkundige objecten, N.V.D.O.-rapport 1983, nr. 3, N.V.D.O., Den Haag.
- [2] Onderhoudsbewust Ontwerpen in de werktuigbouw, N.V.D.O., Den Haag.
- [3] Mooren, A.L. van der, en Smith, P., Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten, de Constructeur 1983, nr. 8, p. 36-45.
- [4] Hankmann, W., Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt, Post-Academische Cursus Bedrijfszekerheid en Onderhoud in ziekenhuizen, Wolfheze, 7, 8 en 9 oktober 1986.
- [5] Mooren, A.L. van der, Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten (5), De Constructeur, 1985, nr. 4, pag. 44-51.

5. Beoordeling van ontwerpalternatieven uit onderhoudsoogpunt

W. Hankmann*

Vrijwel alle technische objecten zijn tijdens gebruik onderhevig aan achteruitgang van hun conditie door slijtage, corrosie etc. Indien de conditie van één of meer van hun componenten een zekere grens overschrijdt, kan het object zijn functie niet meer volgens gestelde eisen vervullen: het faalt. Objecten worden daarom gewoonlijk onderhouden gedurende hun gebruiksduur teneinde hun conditie vast te stellen, te handhaven of te verbeteren. Men kan dergelijke onderhoudsacties aan componenten preventief uitvoeren met het doel falen van het object tegen te gaan; treedt niettemin falen op, dan moet men door correctieve acties de vereiste conditie herstellen. Gegeven de gebruiksomstandigheden schuilt in de keuze van de aard en het aantal van de preventieve acties aan componenten, een belangrijk hulpmiddel om de onderhoudskosten te minimaliseren van een bestaand object. In de ontwerpfase van een object kan men bovendien zijn constructie nog beïnvloeden en streven naar minimale levensduurkosten; daarbij kan bij voorbeeld worden afgewogen of een goedkope component met korte standtijd die vaak wordt vervangen, voordeliger is dan een dure component met lange standtijd die zelden wordt uitgewisseld.

Om dit onderhoudsproces te kunnen optimaliseren, in het bijzonder uit een oogpunt van kosten, moet het in kwantitatieve zin worden beschreven. Omdat het verloop van het proces mede door toevallige factoren wordt bepaald, zoals de standtijd van de componenten, moet dit in statistische termen gebeuren [1]. Wat het aantal preventieve en correctieve acties betreft kan men de preventievrijheid R_p en de bedrijfszekerheid R_c als kenmerkende grootheden definiëren. Wat de omvang van de acties betreft valt in eerste aanleg te denken aan hun tijdsduur; op deze maatstaf kan de onderhoudbaarheid M als kenmerkende grootheid worden gebaseerd. R_p , R_c en M van een object kunnen worden aangeduid als

* Vakgroep Werktuigkundig Ontwerpen voor de Procestechieken
Technische Universiteit Eindhoven

zijn onderhoudseigenschappen; samen karakteriseren zij zijn onderhoudsgedrag onder de gegeven omstandigheden.

Het blijkt mogelijk relaties van kwalitatieve aard aan te geven voor een object tussen enerzijds zijn onderhoudseigenschappen en anderzijds bepaalde kenmerken van zijn constructie, zoals bij voorbeeld zijn bouwwijze [2]. Daaruit kan men aanbevelingen afleiden in de vorm van beoordelingslijsten (checklists) die men kan gebruiken als hulpmiddel om onderhoudsgunstige oplossingen te bedenken in de opeenvolgende ontwerpfasen: eisenpakket, concept en voorontwerp, alsmede het ontwerp, zie fig. 1 [3]. Dergelijke aanbevelingen hebben in eerste aanleg betrekking op één van de genoemde onderhoudseigenschappen: Rp, Rc of M, en kunnen deels strijdig blijken te zijn in hun constructieve uitwerking; in dat geval moet, zoals steeds bij het ontwerpen, naar het beste compromis worden gestreefd.

Nu is het in het algemeen ondoelmatig om te trachten van meet af aan met al deze specifieke aanbevelingen rekening te houden, voor zover dit constructief al uitvoerbaar blijkt. Nog afgezien van genoemde, mogelijke tegenstrijdigheden, valt immers te verwachten dat dit gepaard gaat met extra stichtingskosten waarvan geenszins vaststaat dat zij inderdaad worden gerechtvaardigd door lagere onderhoudskosten. Maar anderzijds is het evenmin wijs het onderhoudsconcept volledig te verontachtzamen tot uitgewerkte alternatieven op tafel liggen. Het ligt voor de hand als tussenweg een beperkt aantal algemene aanbevelingen te formuleren waarvan mag worden aangenomen dat zij gewoonlijk zowel Rp, als Rc en M van de oplossing zullen bevorderen; zie bijvoorbeeld fig. 2, de 'tien geboden', die betrekking hebben op de ontwerpfase.

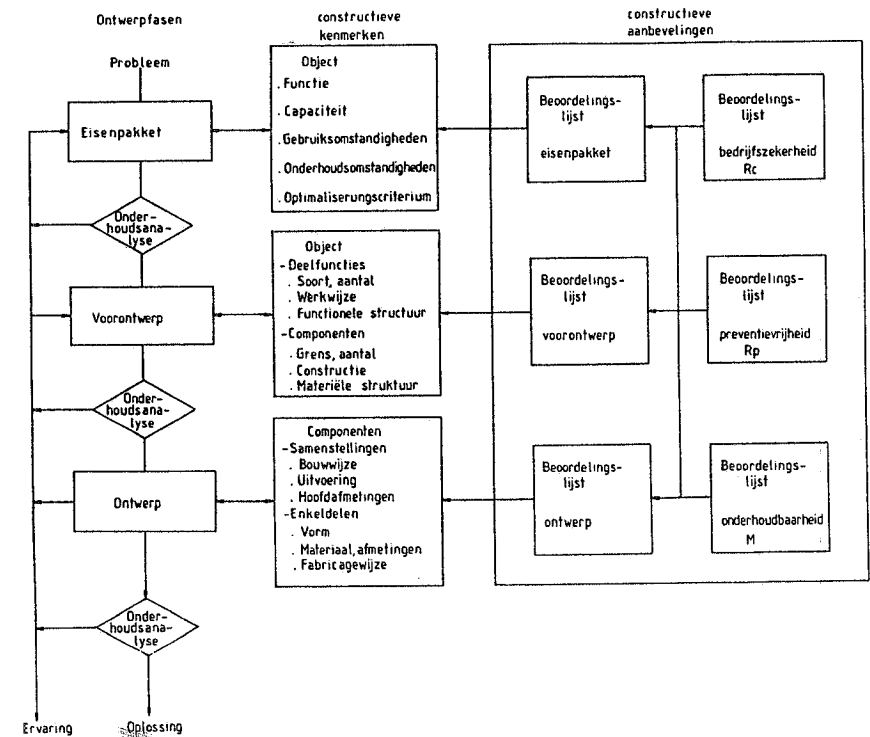


fig. 1 Werkschema Onderhoudsbewust Ontwerpen

TIEN GEBODEN VOOR EEN ONDERHOUDSGUNSTIGE CONSTRUCTIE

1. Vereenvoudig de constructie
2. Gebruik genormaliseerde componenten
3. Verbeter de toegankelijkheid
4. Verbeter de uitwisselbaarheid
5. Pas modulaire bouw toe
6. Bevorder ongevoeligheid voor menselijke fouten
7. Bevorder ongevoeligheid voor schade
8. Bevorder bepaalbaarheid van conditie
9. Pas het "eigen-hulp" beginsel toe
10. Lever onderhoudshandleiding mee

fig. 2 Algemene aanbevelingen in de ontwerpfase

Het lijkt gewenst bij het ontwerpen vanaf het begin dergelijke algemene aanbevelingen op te volgen, voor zover zij althans geen of weinig stichtingskosten oproepen. Specifieke aanbevelingen ter verhoging van R_p of R_c of M kan men - zeker als deze kostenverhogend werken - beter in tweede instantie nastreven, nadat een evaluatie heeft aangetoond dat het te verwachten gedrag van bepaalde componenten en/of het object als geheel, niet aan de gestelde eisen of wensen voldoen. Indien deze pogingen niet tot een of meer aanvaardbare alternatieven leiden, moet men terugkeren tot het voorontwerp of zelfs tot het eisenpakket, en trachten alsnog in die ontwerpfase betere alternatieven te bedenken.

De ontwerpprocedure, iteratief van aard, levert gewoonlijk meerdere alternatieven op; zij vormen het uitgangspunt bij het zoeken naar het optimale ontwerp, als oplossing van het gestelde probleem. Om de procedure te kunnen afwerken, moet men beschikken over een methode om de te verwachten onderhoudseigenschappen van alternatieven te evalueren, zowel in de voorontwerp- als in de ontwerpfase. Wij stellen aan deze methode, die wij kortweg onderhoudsanalyse zullen noemen, de volgende eisen:

1. de methode moet aangeven welke componenten binnen een alternatief uit onderhoudsoogpunt de zwakke plekken vormen en in welke mate dat het geval is, zodat men die eventueel volgens een prioriteitsvolgorde kan elimineren.
2. de methode moet leiden tot een samenvattend oordeel over het onderhoudsgedrag van een alternatief als geheel, zodat vergelijking van alternatieven onderling en met externe normen mogelijk is.
3. het samenvattend oordeel over het onderhoudsgedrag moet zijn gegoten in een vorm die combinatie met andere kwaliteitskenmerken toelaat om selectie van het beste alternatief als oplossing van het ontwerpprobleem mogelijk te maken.

Afhankelijk van de objecteigenschappen waarop men de onderhoudsanalyse baseert, komen de volgende mogelijkheden in aanmerking om deze uit te voeren:

- constructieanalyse waarbij wordt nagegaan in hoeverre de constructieve kenmerken van het object aan algemene en/of specifieke aanbevelingen voldoen.
- gedragsanalyse waarbij uit de constructie en zijn gebruiksomstandigheden wordt afgeleid welke onderhoudsacties naar aard en aantal zijn te verwachten.
- kostenanalyse waarbij uitgaande van de gedragsanalyse de hoogte van de onderhoudskosten wordt bepaald.

Bij de uitwerking van deze mogelijkheden laten wij verder het voorontwerp buiten beschouwing en beperken ons tot het ontwerp. Om goed bruikbaar te zijn moet de analyse kwantitatief van aard zijn; vooraf worden daarom in aanmerking komende beoordelingsschalen besproken. Dit eerste deel wordt afgesloten met een samenvatting en met een evaluatie van de toepassingsmogelijkheden van de drie methoden.

Beoordelingsschalen

De beoordelingsschalen van alternatieven moet stoelen op waardering van één of meer relevante kwaliteitscriteria, bijvoorbeeld de eenvoud van de constructie. Bij een kwantitatieve beoordeling moet men elke alternatief door middel van een getal een plaats toewijzen op een beoordelingsschaal. Men onderscheidt de volgende schalen (fig. 3) [4]:

- de nominale schaal: de getallen dienen slechts ter identificatie van de alternatieven; voorbeeld: identiteitsnummer, zoals rugnummers van voetballers.
- de ordinale schaal: de getallen geven de rangorde aan waarin de alternatieven in toe- of afnemende mate aan een kwaliteitskenmerk voldoen; voorbeeld:

- voorkeur, bijvoorbeeld de volgorde van de top-tien van de hit-parade.
- de intervalschaal: de getallen geven de kwaliteitsverschillen aan tussen de alternatieven, hetgeen vereist dat voor de schaal een (constante) kwaliteitseenheid wordt gedefinieerd; voorbeeld: temperatuur in °C.
 - de ratioschaal: de getallen geven recht evenredig de kwaliteitsverhouding aan tussen twee alternatieven, hetgeen vereist dat voor de schaal een (constante) kwaliteitseenheid en een kwaliteitsnulpunt worden gedefinieerd; voorbeeld: aantal, lengte, tijd, kosten, temperatuur in K.

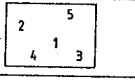
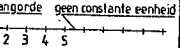
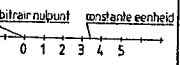
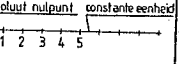
schaal	schematische voorstelling	voorbeeld	toelaatbare rekenkundige bewerkingen
nominale schaal		rugnummers	geen
ordinaire schaal		top-tien	geen
interval-schaal		temperatuur (°C)	optellen en aftrekken
ratio-schaal		lengte	optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen

fig. 3 Beoordelingsschalen

De nominale schaal is onbruikbaar om tot keuzen te komen omdat men daarop wel kan aangeven dat alternatieven tot een bepaalde groep behoren, maar niet hun kwaliteitsverschillen tot uitdrukking kan brengen; wij laten deze verder buiten beschouwing.

De ordinale schaal legt een rangorde van de alternatieven vast, zonder een uitspraak te doen over de grootte van de verschillen of de verhouding van hun kwaliteiten. Logische conclusies zijn wel mogelijk (bijvoorbeeld als A beter is dan B en B is beter dan C, dan is A beter dan C), maar rekenkundige bewerkingen niet. Men kan dus niet aangeven hoeveel A van B verschilt of hoeveel maal A beter is dan B.

De interval-schaal is gedefinieerd door een constante kwaliteitseenheid, zodat optellen en aftrekken van de gegeven waarderingen is toegestaan. Men kan dus aangeven dat A en B 2 eenheden verschillen of dat het verschil tussen A en B x zo groot is als het verschil tussen B en C. Het eventuele nulpunt van de

schalen heeft geen fysische betekenis en kan arbitrair worden gekozen; daarom zijn vermenigvuldigen en delen niet toegestaan; men kan dus niet aangeven dat A 2x zo groot is als B.

De ratioschaal veronderstelt niet alleen een constante eenheid, maar ook kennis van het absolute nulpunt op grond van metingen of theoretische overwegingen, zoals dat bij fysische grootheden mogelijk is. De schaal laat alle rekenkundige bewerkingen toe, ook vermenigvuldigen en delen, zodat bij kenmerken die op deze schaal zijn afgebeeld niet alleen kan worden gesteld dat bij voorbeeld A en B drie eenheden verschillen, maar bijvoorbeeld ook dat A 4x zo goed is als B.

In de praktijk zal men de beoordeling van alternatieven meestal op grond van meer dan één kwaliteitskenmerk willen vaststellen. Daartoe moeten dus een aantal deelbeoordelingen worden gecombineerd, bijvoorbeeld ten aanzien van de mate waarin aan elk van de 10 geboden wordt voldaan.

Uit het voorgaande blijkt dat dit in feite niet mogelijk is indien één of meer deelbeoordelingen zijn gebaseerd op een ordinale schaal, want die laat geen optellen toe, terwijl vermenigvuldigen al helemaal uit den boze is. Indien de deelbeoordelingen zijn gebaseerd op interval-schalen met dezelfde kwaliteitseenheid, kan men wel sommeren en krijgt dan een resultaat op een interval-schaal; de ligging van het nulpunt heeft echter geen betekenis en is afhankelijk van de gekozen nulpunten van de deelschalen. Wil men het resultaat afbeelden op een ratioschaal, dan moeten ook de te combineren kenmerken op ratio-schalen met overeenkomstig nulpunt en dezelfde kwaliteitseenheid zijn gewaardeerd.

Het is duidelijk dat het inschalen van alternatieven met betrekking tot een aantal kwaliteitskenmerken op ordinale, interval- en ratioschalen in deze volgorde steeds hogere eisen stelt aan de uitgangsgegevens en steeds omslachtiger wordt. Het is immers gemakkelijker ten aanzien van een bepaalde eigenschap aan te geven of A beter is dan B, dan te stellen hoe groot het verschil of de verhouding tussen A en B is. Moet of wil men met gecombineerde beoordelingen of rangordes schalen volstaan, dan moet men er rekening mee houden dat optellen tot vertekende of foute conclusies kan leiden en dat vermenigvuldigen in het algemeen ontoelaatbaar is. De implicaties van bovenstaande overwegingen zullen in het volgende duidelijk worden bij de behandeling van een voorbeeld; wij zullen ons daarbij beperken tot beoordelingen op ordinale en ratioschalen.

Constructieanalyse

Een constructieanalyse ten aanzien van onderhoudsaspecten moet worden gebaseerd op in dat opzicht relevante constructieve kenmerken. Voor het ontwerp kan men daartoe teruggrijpen op de eerder genoemde aanbevelingen ten aanzien van R_p , R_c en M , zie fig. 2. Uit deze aanbevelingen kan men aspecten schrappen die niet van toepassing zijn, en de resterende aanbevelingen desgewenst verbijzonderen; als aspect van eenvoud kan bijvoorbeeld het aantal bewegende delen worden onderscheiden. De mate waarin de alternatieven aan deze aanbevelingen voldoen, vormt een indicatie voor hun te verwachten onderhoudsgedrag. Indien de onderlinge vergelijking slechts één criterium betreft, bijvoorbeeld het aantal bewegende delen, kan men de alternatieven in de volgorde plaatsen waarin zij die eigenschap in afnemende mate bezitten. Betreft de vergelijking meerdere eigenschappen, bijvoorbeeld bovendien de werkomstandigheden, modulaire bouw en gevoeligheid voor schade, dan kan men eerst voor elke eigenschap de rangorde van de alternatieven vaststellen. Vervolgens kan men door optellen bepalen welk alternatief met de laagste totaal-score, dus als beste uit de bus komt (fig. 4). Maar omdat de deelschalen ordinale schalen zijn, is deze laatste bewerking onzuiver, zodat vertekende uitkomsten het gevolg kunnen zijn. Het rangordenummer van een alternatief houdt immers niet zonder meer evenredigheid in met de mate waarin aan het beschouwde kenmerk wordt voldaan.

KENMERK	ALTERNATIEF						
	1	2	3	4	5	6	7
a	4	2	5	1	3	7	6
b	6	1	5	7	4	3	2
c	5	3	6	4	2	1	7
d	6	4	2	3	7	1	5
e	1	3	6	2	5	4	7
som	22	13	24	17	21	16	27
rang	5	1	6	3	4	2	7

fig. 4 Rangordebepaling bij meerdere keuzekenmerken

In deze opzet tellen bovendien alle kenmerken even zwaar mee, hetgeen in het algemeen niet realistisch is. Het is wel mogelijk ook aan de belangrijkheid van de kenmerken een volgorde toe te kennen, eveneens door paarsgewijze vergelijking. Maar gebruik van de rangordenummers van de kenmerken als een soort 'weegfactor' voor de rangordenummers van de alternatieven, is ontoelaatbaar. Het rangordenummer van een kenmerk is immers niet bij voorbaat evenredig met zijn belangrijkheid zodat de vereiste vermenigvuldiging veelal tot foutieve uitkomsten zal leiden.

Bij afbeelding op een ordinale schaal kan dus geen rekening worden gehouden met de grootte van de verschillen tussen de rangnummers en evenmin met de verschillen in belangrijkheid tussen de kenmerken. Om aan deze bezwaren tegemoet te komen, kan men trachten de constructieanalyse te baseren op een ratio-schaal, dus zoeken naar eenzelfde constante eenheid van waarde en naar 'natuurlijke' nulpunten per deelschaal. Bij het waarderen van de deeleigenschappen op de deelschalen is het gebruikelijk als scores de cijfers van 0-4 of van 0-10 toe te kennen.

De nulpunten van de deelschalen worden vastgesteld door na te gaan bij welke waarde van de betreffende deeleigenschap zijn bijdrage tot de kwaliteit van het resultaat juist 0 is, dus nog niet onaanvaardbaar slecht. De hoogste waardering kan men toekennen aan een 'ideale' oplossing. Deze omzetting van de in eerste aanleg kwalitatieve beoordeling in scores, kan bijvoorbeeld gebeuren door vooraf per kenmerk aan elk toe te kennen cijfer een kwalitatieve waardering te koppelen. In het voorbeeld van fig. 5 is een dergelijk systeem opgenomen, ontleend aan [5], en wederom in relatie gebracht tot de mate waarin wordt voldaan aan enkele van de '10 geboden'.

Om te bereiken dat per deelschaal dezelfde waarde-eenheid wordt gehanteerd, moet men de hoogst mogelijke waardering corrigeren door middel van een gewichtsfactor die het relatieve belang van de deeleigenschappen in het resultaat in rekening brengt. Verschillen in belangrijkheid tussen de beoordelingskenmerken kan men uitdrukken door bijvoorbeeld 1, 10 of 100 punten over alle kenmerken te verdelen. Zodoende kan per alternatief i ($i=1\dots n$) en voor elk kenmerk j ($j=1\dots m$) met gewicht v_j de behaalde scores e_{ij} worden vastgesteld. Het product $v_j * e_{ij}$ waardeert de bijdrage die de eigenschap j levert tot de waarde van het alternatief i . De totale waarde w_i van alternatief i bedraagt dan:

$$w_i = \sum_{j=1}^m v_j * e_{ij}$$

Het beste alternatief behoort bij de hoogste waarde die aldus wordt gevonden, de kwaliteit van de overige alternatieven is naar rato minder.

Met deze aanpak wordt beoogd om vanuit beoordeling op een in wezen ordinale schaal, zo goed mogelijk een ratioschaal te benaderen, en wel door op de deelschalen gelijke afstanden te creëren en bovendien aan de deelschalen reële nulpunten toe te kennen. Het valt te verwachten dat het resultaat onzuiver zal zijn, want de aard van de te waarden kenmerken bemoeilijkt de uitvoering en vooral bij de keuze van de nulpunten kan men vraagtekens plaatsen. Niettemin zal het resultaat in het algemeen betrouwbaarder en beter gedifferentieerd uitvallen dan bij een rangordebepaling mogelijk is, zodat het extra werk toch verantwoord kan zijn.

	ALGEMENE KWALIFICATIES	RELEVANTE ONDERHOUDSASPECTEN (UIT 10 GEBODEN)			
		eenvoud	toegankelijkheid	modulaire bouw	ongevoeligheid schade
0	zeer slecht	zeer ingewikkeld	zeer slecht	geheel afwezig	zeer gevoelig
1	gebrekkig	ingewikkeld	gebrekkig	vrijwel niet	gevoelig
2	voldoende	normaal	voldoende	enkele modules	redelijk
3	goed	eenvoudig	goed	veel modules	vrij ongevoelig
4	uitstekend	zeer eenvoudig	uitstekend	geheel gemodulariseerd	ongevoelig

fig. 5 Kwantificering van onderhoudsaspecten op 5-punts schaal

Een constructieanalyse in de beschreven vorm verschaft primair een oordeel over het object als geheel en maakt dus vergelijking van objecten onderling mogelijk (eis 2). Wil men een alternatief verbeteren omdat het slecht uit de bus komt, dan kan men wel nagaan aan welke eigenschap(en) dit ligt, maar men heeft geen directe aanwijzing aangaande de componenten die daaraan debet zijn en in welke mate (eis 1). Voor zover het oordeel op een ordinale schaal wordt verkregen, is dit ongeschikt voor combinatie met andere eigenschappen bij de selectie van het beste alternatief (eis 3). De methode voldoet dus slechts ten dele aan de gestelde eisen, is slechts beperkt bruikbaar, maar is wel eenvoudig, snel en goedkoop uit te voeren.

Gedragsanalyse

Uitvoering

Om het te verwachten onderhoudsgedrag van een ontwerp op te sporen, ligt het voor de hand eerst de optredende preventieve en correctieve acties uit het ontwerp af te leiden en na te gaan hoe die moeten worden uitgevoerd. Vervolgens moet men, teneinde tot afwegingen en beslissingen te kunnen komen, bepalen hoe vaak die acties voorkomen en hoe groot de offers zijn die zij vergen. De onderhoudsgedragsanalyse van een object kan men aldus in drie samenhangende deelanalyses opsplitsen, die elk een kwalitatief en kwantitatief gedeelte omvatten en per component worden uitgevoerd (fig. 6):

- preventievrijheidsanalyse: welke preventieve acties vergt de component en hoe vaak?
- bedrijfszekerheidsanalyse: op welke wijze kan de component falen, welke correctieve acties zijn dan nodig en hoe vaak komt dat naar verwachting voor?
- onderhoudbaarheidsanalyse: wat is de werkwijze bij de preventieve en correctieve acties, welk onderhoudsniveau moet die uitvoeren, welke uitrusting is daarbij nodig en hoe groot zijn de offers, bijvoorbeeld aan manuren, die zij vergen?

AARD VAN DE ACTIES	COMPONENT	KWALITATIEF		KWANTITATIEF	
		kwantitatieve Rp-analyse wat?	kwantitatieve M-analyse hoe?	kwantitatieve Rp-analyse hoe vaak?	kwantitatieve M-analyse hoe groot?
PREVENTIEF	a	1	-----	-----	-----
	b	1	-----	-----	-----
CORRECTIEF	a	1	-----	-----	-----
	b	1	-----	-----	-----

fig. 6 Opbouw van de onderhoudsgedragsanalyse

De onderhoudsgedragsanalyse vangt kwalitatief aan met de vraag welke componenten naar verwachting onderhoudsacties zullen vergen. Hier bestaat overeenkomst met de zogenaamde failure mode and effect analysis (f.m.e.a.), een

systematische opsporing van faalwijzen 'from bottom to top' bij technische objecten. Het begrip 'failure' is uitgebreid met de behoefte aan verzorging en inspectie; het begrip 'effect' is verbijzonderd door de resulterende onderhoudsacties.

De kwalitatieve inventarisatie moet een kwantitatief vervolg krijgen. Dit is mogelijk door de preventieve en correctieve acties in te delen in een aantal klassen, zowel wat hun te verwachten frequentie betreft als de te verwachten bijbehorende offers, zoals door de onderhoudbaarheid bepaald. De schatting van de frequentie moet worden betrokken op een vooraf vast te stellen beoordelingsperiode, bijvoorbeeld de levensduur of de revisieperiode. De schatting van de offers moet worden gebaseerd op de beschikbare onderhoudsmiddelen waarvan aard en omvang dus bekend moeten zijn. Als meetbaar kenmerk voor de onderhoudbaarheid kan bijvoorbeeld de tijdsduur (klokuren) van de betreffende onderhoudsacties worden gekozen. Voor de indeling in klassen kan gebruik worden gemaakt van de klassegrenzen en bijbehorende kengetallen, zoals die in fig. 7 en fig. 8 zijn vermeld. De kengetallen C_p en C_c waarderen de frequentie, c.q. het gemiddelde interval van respectievelijk preventieve en correctieve acties, het kengetal C_m de offers in uren voor hun uitvoering. Merk op dat de gekozen kengetallen ongeveer overeenkomen met klasse-gemiddelden; hiermee wordt een ratioschaal nagestreefd.

Kengetal C_p, C_c	Klassegrenzen	
	gemiddeld interval (jaar)	frequentie (jaar ⁻¹)
1/16	20 - 12	0,05 - 0,1
1/8	12 - 6,5	0,1 - 0,15
1/4	6,5 - 2,5	0,15 - 0,4
0,5	2,5 - 1,25	0,4 - 0,75
1	1,25 - 0,75	0,75 - 1,25
2	0,75 - 0,4	1,25 - 2,5
4	0,4 - 0,15	2,5 - 6,5
8	0,15 - 0,1	6,5 - 12
16	0,1 - 0,05	12 - 20

fig. 7 Mogelijke karakterisering van het aantal onderhoudsacties

De procedure voor een gedragsanalyse is elders gedetailleerd beschreven in de vorm van een handleiding [6]. De waarde van de kengetallen zal de ontwerper in het algemeen samen met de onderhoudsuitvoerders moeten schatten. De resultaten van de gedragsanalyse kunnen grafisch worden weergegeven in een 'gedragsprofiel', zie fig. 9. Daarin staan in de kolommen 2 en 3 de componenten met hun onderhoudsacties. In de kolommen 4 en 5 zijn voor alle acties de scores C_p of C_c of C_m uitgezet, in kolom 6 hun produkt:

$$C_{sp} = C_p \times C_m \text{ voor preventieve acties}$$

$$C_{sc} = C_c \times C_m \text{ voor correctieve acties}$$

Kengetal C_m	Klassegrenzen (uren)
1/16	< 0,75
1/8	0,75 - 1,25
1/4	1,25 - 2,5
1/2	2,5 - 6,5
1	6,5 - 12
2	12 - 20
4	20 - 40
8	40 - 80
16	> 80

fig. 8 Mogelijke karakterisering van de duur van de onderhoudsacties

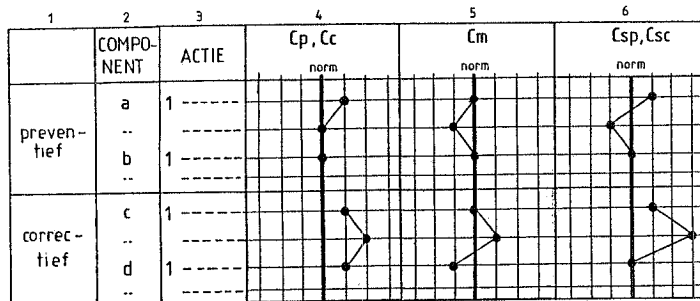


fig. 9 Onderhoudsprofiel

Aangezien de kengetallen Cp en Cc overeenkomen met de gemiddelde frequentie van de acties en het kengetal Cm evenredig is met hun duur, vormen de kengetallen Csp en Csc een maat voor de totale onderhoudsduur van de betreffende preventieve en correctieve acties tijdens de beschouwde periode. De som van de scores Csp en Csc, genomen over alle acties aan alle componenten, is dus een maat voor de totale, geschatte onderhoudsduur van het object tijdens de beschouwde periode; wel wordt zodoende geen rekening gehouden met eventuele overlappingsen. Het onderhoudsprofiel laat op overzichtelijke wijze uitschietters ten aanzien van frequentie en/of omvang van de onderhoudsacties zien, zowel in gunstige als in ongunstige zin. Met een verticale lijn kan men, per object te kiezen, een norm aangeven die de grens vormt tussen wat wel en wat niet toelaatbaar wordt geacht.

De gedragsanalyse is gebaseerd op een inventarisatie van de te verwachten preventieve en correctieve onderhoudsacties aan de componenten. Door toepassing van ratioschalen bij de kengetallen voor de frequentie en omvang van de onderhoudsacties kunnen over de beschouwde periode de totale onderhoudsoffers per component worden berekend en mag sommatie over alle componenten plaatsvinden. Een gedragsanalyse in de beschreven vorm leidt tot een oordeel over het gedrag van de componenten (eis 1) en dat van het object als geheel (eis 2). Dit samenvattend oordeel, uitgedrukt in uren, is beperkt bruikbaar bij de optimalisering (eis 3). De methode voldoet vrij goed aan de gestelde eisen, maar is ook vrij omslachtig, dus tijdrovend en kostbaar. Deze nadelen kan men veelal ondervangen door slechts een beperkt aantal 'relevante' componenten in de analyse te betrekken. Mits deze goed worden gekozen op grond van ervaring, wordt beduidend sneller inzicht verkregen in het onderhoudsgedrag van de belang-

rijkste componenten en van het object als geheel. Vergelijking met andere objecten wordt echter bemoeilijkt en het resultaat daarvan minder betrouwbaar.

Kostenanalyse

De onderhoudskosten OK omvatten in de eerste plaats de onderhoudsuitvoeringskosten met als belangrijkste bestanddelen de directe loon- en materiaalkosten voor preventieve en correctieve acties; ook indirecte kosten zoals voor gereedschappen, behoren daartoe. Bovendien zijn tot de onderhoudskosten te rekenen de onderhoudsafhankelijke kosten, opbrengstverliezen veroorzaakt door verstoring van de produktiegang die zich onder andere kunnen uiten in overwerk, produktiederving en/of deklassering. Schatting van de onderhoudskosten van alternatieven met het doel deze te kunnen afwegen tegen doorgaans vrij goed bekende verschillen in aanschafkosten, moet uiteraard vrij nauwkeurig zijn en moet daarom niet op een constructieanalyse, maar op een gedragsanalyse worden gebaseerd. De hoogte van de te verwachten onderhoudsuitvoeringskosten OUK van een object wordt gevormd door de som van de kosten voor alle preventieve en correctieve acties bij alle componenten.

$$(OUK)_P = \sum_{i=1}^n g^* C_{sp}(i)^* p_i^* l_i + C_p(i)^* (r_i + h_i)$$

$$(OUK)_C = \sum_{j=1}^m g^* C_{sc}(j)^* p_j^* l_j + C_c(j)^* (r_j + h_j)$$

waarin:

$(OUK)_P$ = preventieve onderhoudsuitvoeringskosten per jaar

$(OUK)_C$ = correctieve onderhoudsuitvoeringskosten per jaar

i = preventieve onderhoudsactie

n = totaal preventieve onderhoudsacties

j = correctieve onderhoudactie

m = totaal aantal correctieve onderhoudsacties

Csp = kengetal voor de totale duur van een preventieve actie

Csc = kengetal voor de totale duur van een correctieve actie

p = aantal mensen per actie (ploeggrootte)

l = tarief mensuur

r = kosten reservedelen, voor zover niet begrepen in l, per actie

h = kosten hulpmiddelen, voor zover niet begrepen in l, per actie

Aangenomen is dat alle toe te rekenen kosten al in de bovengenoemde posten l, r en h zijn verwerkt. De kengetallen Csp en Csc kunnen worden ontleend aan het onderhoudsprofiel. De overige posten moet de ontwerper schatten, samen met

de onderhoudsuitvoerders.

Het kan moeilijk zijn om ook de onderhoudsafhankelijke kosten OAK te schatten, onder andere omdat deze sterk worden beïnvloed door de marktsituatie. Toch ontkomt men hier meestal niet aan, omdat deze kostenpost gewoonlijk van dezelfde grootte is als de onderhoudsuitvoeringskosten en mede daarom vaak impuls vormt tot het aanbrengen van verbeteringen aan bestaande objecten. In het algemeen zal men OAK kunnen splitsen in een deel dat uitsluitend afhankelijk is van het aantal produktieonderbrekingen en een deel dat afhankelijk is van de duur van die onderbrekingen. Voor preventieve, respectievelijk correctieve acties geldt dan:

$$(OAK)_p = \sum_{i=1}^n a_i * Cp(i) + b_i \sum_{i=1}^n 8^* Csp(i)$$

$$(OAK)_c = \sum_{j=1}^m a_j * Cc(j) + b_j \sum_{j=1}^m 8^* Csc(i)$$

waarin:

- (OAK)_p = preventieve onderhoudsafhankelijke kosten per jaar
- (OAK)_c = correctieve onderhoudsafhankelijke kosten per jaar
- Cp = kengetal voor de frequentie van preventieve acties
- Cc = kengetal voor de frequentie van correctieve acties
- a = onderhoudsafhankelijke kosten per gebeurtenis
- b = onderhoudsafhankelijke kosten per uur

De totale onderhoudskosten OK per jaar bedragen:

$$OK = (OAK)_p + (OAK)_c + (OAK)_p + (OAK)_c$$

Vaak leiden falen, correctieve en preventieve acties nog tot andere gevolgen, namelijk tot schade voor het object zelf en voor zijn omgeving. Denk daarbij onder andere aan (fig. 10):

- het object zelf: sleutelfouten, bekorting levensduur etc.
- andere objecten in de omgeving: beschadiging, vastlopen etc.
- de mens: onveiligheid, ongemak in de directe omgeving etc.
- het bedrijf: vergoedingen, organisatieverliezen etc.
- de markt: verlies aan goodwill etc.
- de samenleving: schade aan de mens en natuur in verre omgeving etc.

Voor zover deze schade qua frequentie en omvang meetbaar is kan men die in de kostenanalyse betrekken. De methode geeft een absolute schatting in geld van

onderhoudsbehoefte van een alternatief als geheel, alsmede van de bijdragen daartoe van zijn componenten. Daarmee is volledig voldaan aan de drie eisen die in de aanvang werden geformuleerd.

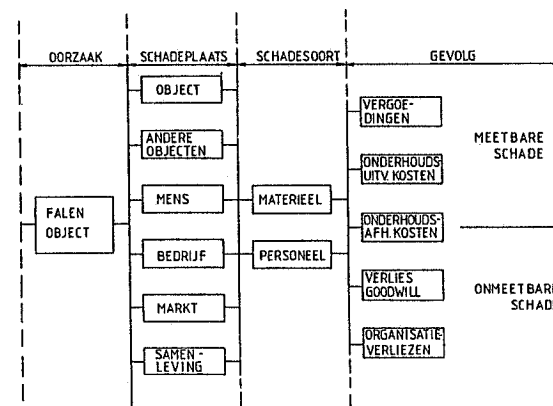


fig. 10 Ontstaan van schade door falen object

Besluit

De mérites van de besproken methoden voor het uitvoeren van een onderhoudsanalyse, te weten de constructieanalyse, de gedragsanalyse en de kostenanalyse zijn samengevoegd in fig. 11.

	WERKWIJZE			
	constructieanalyse		gedragsanalyse	kostenanalyse
- beoordelingschaal	ordinaal	ratio	ratio	ratio
- ontwerpfase				
• voorontwerp	X	0	0	0
• ontwerp	X	X	X	X
- geschiktheid				
• zwakke componenten	-	-	++	++
• vergelijking alternatieven	□	+	++	++
• optimalisatie	-	□	+	++
- benodigde middelen	gering	vrij gering	vrij veel	veel

++ uitstekend
 + goed
 □ voldoende
 - onvoldoende

X toepasbaar
 0 niet toepasbaar

fig. 11 Vergelijking methoden voor onderhoudsanalyse

De constructieanalyse berust op analyse van de constructieve kenmerken van het object als geheel, door vergelijking met een aantal relevante aanbevelingen. Het resultaat moet soms worden afgebeeld op een ordinale schaal omdat een ratioschaal niet altijd haalbaar is. De methode geeft geen direct inzicht in zwakke componenten, wel een oordeel over het object als geheel, maar niet in

termen die bij optimalisering combinatie met andere kwaliteitskenmerken goed mogelijk maakt. De methode is relatief snel en goedkoop uit te voeren. De gedragsanalyse berust op een inventarisatie per component van de aard, de frequentie en de omvang van de benodigde onderhoudsacties; de kostenanalyse bouwt hierop voort door berekening van de onderhoudsuitvoeringskosten en de onderhoudsafhankelijke kosten. Beide methoden kunnen leiden tot een resultaat dat wordt weergegeven op een ratioschaal en beide kunnen inzicht leveren in het gedrag, zowel van de componenten als van het object als geheel. Voor de optimalisatie is het resultaat van de kostenanalyse beter geschikt dan dat van de gedragsanalyse. Het uitvoeren van een gedragsanalyse leidt tot een betrouwbaarder en beter gedifferentieerd resultaat dan een constructieanalyse, maar is vrij omslachtig, dus duur, tenzij op grond van ervaring beperking tot relevante componenten mogelijk is. Een aansluitende kostenanalyse zal in het algemeen relatief weinig extra tijd en geld vragen.

Alle drie methoden dragen een heuristisch karakter; als 'heuristisch' betitelen wij een aanpak die weliswaar niet bewijsbaar tot de beste oplossing voert, maar waarvan de ervaring leert dat deze doorgaans wel tot goede antwoorden leidt. De methoden helpen de gebruiker de analyse stapsgewijs en volledig uit te voeren. Het is te verwachten dat deze wijze van werken beter is dan een intuïtieve, ongestructureerde benadering, omdat alle aspecten achtereenvolgens aan de orde komen en op hun relevantie en mérites worden getoetst. Ook met deze methoden is echter kennis en ervaring onmisbaar; ter ondersteuning en om ervoor te zorgen dat in ieder geval de belangrijkste mogelijkheden in aanmerking worden genomen, kan worden teruggегреpen op beoordelingslijsten. Om de kans op onvolledigheid en/of onevenwichtigheid te verkleinen, moet de ontwerper de analyse bij voorkeur uitvoeren in overleg met deskundigen vanuit andere disciplines, in het bijzonder de gebruiker en de onderhouder. Overigens zijn de methoden ook geschikt om gebruikt te worden bij bestaande objecten die verbetering behoeven.

Zowel voor de onderhoudsgedragsanalyse als voor de onderhoudskostenanalyse zijn rekenprogramma's geschreven. Toepassing daarvan heeft als voordeel dat de onderhoudsanalyse in het algemeen sneller kan worden uitgevoerd en dat door de systematische aanpak de kans kleiner is dat daarbij componenten of onderhoudsaspecten over het hoofd worden gezien. Deze programma's zullen te zijner tijd als modules worden ingepast in een rekenprogramma dat ontwerpen op minimale levensduurkosten ten doel heeft in overeenstemming met het gelijknamige onderzoekthema van vakgroep W.O.P.

Literatuur

- [1] Mooren, A.L. van der, en Smith, P., Onderhoudsgedrag van werktuigkundige objecten. De Constructeur 1982, nr. 12, p. 22-28, 1983, nr. 2, p. 26-33, 1983, nr. 8, p.36-45, 1984, nr. 6, p. 38-45, 1984, nr. 8, p. 32-38 en 1985, nr. 4, p. 44-51.
- [2] Mooren, A.L. van der, en Smith, P., Onderhoudsbewust Ontwerpen in de Werktuigbouw, De Constructeur, 1981, nr. 9, p. 76-84 en 1981, nr. 10. p. 58-67.
- [3] Onderhoudsbewust Ontwerpen in de Werktuigbouw, N.V.D.O.-rapport 1983/1, Vereniging ten behoeve van Technische en Onderhoudsdiensten, 's-Gravenhage, maart 1983.
- [4] Archer, L.B., Technological innovation, a methodology, Frimley, Inforlink Ltd, 1971, 3.1-3.12.
- [5] Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI-Richtlinie 2225, Blatt 1, april 1977.
- [6] Handleiding Onderhoudsgedragsanalyse, PATO-cursus Onderhoudsbewust Ontwerpen, T.H. Eindhoven, oktober 1982.