

# ONDERHOUDSBEWUST ONTWERPEN NU EN IN DE TOEKOMST

Redactie: ir. G. Laurentius



# ONDERHOUDSBEWUST ONTWERPEN NU EN IN DE TOEKOMST

## ONDERHOUDSBEWUST ONTWERPEN NU EN IN DE TOEKOMST

Redactie: J. H. L. van den Broek

groot  
bladzwaai  
jaarboek '83



De redactie aanvaardt aansprakelijkheid voor de inhoud van de artikelen en de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen.

De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen.

De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor schade van welke aard ook die voortvloeit uit het gebruik van de afbeeldingen.



stichting  
toekomstbeeld  
der techniek

De Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), in 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut voor Ingenieurs, heeft als doel:

- het van de ingenieurswetenschappen uit bestuderen van mogelijke toekomstige technische ontwikkelingen, in samenhang met andere maatschappelijke ontwikkelingen
- het op ruime schaal bekend maken van de resultaten van die studies om daarmee bij te dragen tot het verkrijgen van een meer integraal beeld van de toekomstige Nederlandse samenleving.

STT richt zich daarbij tot het bedrijfsleven, de overheden, het onderwijs en - uiteraard - de geïnteresseerde staatsburger.

Het adres van STT is Prinsessegracht 23, Postbus 30424, 2500 GK 's Gravenhage, telefoon (070) 91 99 00.

# ONDERHOUDSBEWUST ONTWERPEN NU EN IN DE TOEKOMST

redactie: ir. G. Laurentius

1987

Samsom Alphen aan den Rijn/Brussel

Omslagontwerp: Rob Eckhardt

CIP

© MCMLXXXVII Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 's-Gravenhage  
D/MCMLXXXVII/227 ISBN 90 14 03716 3

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this work may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Voor reproductie(s) zoals bedoeld in art. 16b en 17 van de Auteurswet 1912 (ten bate van eigen oefening, studie enz. en/of ten bate van organisaties, instellingen enz.) van een of meer pagina's is een vergoeding verschuldigd. Voor inlichtingen betreffende de hoogte en afdracht van de vergoeding kan men zich wenden tot de Stichting Reprorecht te Amstelveen.

---

# Inhoud

<b>Inleiding</b>	7
Probleemstelling	7
Opbouw van de publikatie	8
Conclusies en aanbevelingen	8
<b>1. Algemene inzichten en methoden</b>	12
1.1 De ontwikkeling van het onderhoud	12
1.2 Enkele gebruikte termen	13
1.3 Onderhoudsbewust ontwerpen	17
1.4 Nieuwe technische ontwikkelingen	31
<b>2. Wegenbouw</b>	34
2.1 Inleiding	34
2.2 Het ontwerpen	35
2.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst	40
2.4 Gevolgen voor de aard en omvang van het onderhoud	47
<b>3. Bouw</b>	49
3.1 Inleiding	49
3.2 Onderhoud	52
3.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst	53
<b>4. Procesindustrie</b>	57
4.1 Inleiding	57
4.2 Elektromotoren	57
4.3 Pompen	59
4.4 Ketels en procesfornuizen	65
4.5 De gevolgen voor de onderhoudsdienst	67
<b>5. Vliegtuigbouw</b>	68
5.1 Inleiding	68
5.2 Onderhoud	69
5.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst	70
<b>6. Kantoorautomatisering</b>	77
6.1 Inleiding	77

6.2	Kopieerapparatuur	77
6.3	De tekstverwerker	84
6.4	Programmatuur	86
6.5	Kantoorsystemen	89
<b>7.</b>	<b>Wasmachines</b>	91
7.1	Inleiding	91
7.2	Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst	91
7.3	De gevolgen voor de onderhoudsdienst	95
<b>8.</b>	<b>Personenauto's</b>	96
8.1	Inleiding	96
8.2	Onderhoud	98
8.3	Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst	100
8.4	Gevolgen voor de consument	106
8.5	Gevolgen voor de met de auto verbonden bedrijvigheid	107
	<b>Gebruikte termen en hun betekenis</b>	109
	<b>Organisatie van de studie</b>	112
	<b>Literatuur</b>	116
	<b>STT-publikaties</b>	121

---

# Inleiding

## Probleemstelling

De beheersing van de onderhoudskosten wordt voor de Nederlandse industrie en overheid steeds belangrijker. Dat wordt veroorzaakt door drie ontwikkelingen. In de naoorlogse wederopbouw is het aantal wegen en woningen sterk toegenomen. Gezien het krappe budget van de overheid zal deze voorraad tegen zo laag mogelijke kosten moeten worden onderhouden.

De toenemende kapitaalintensiteit van de industrie vereist een zo hoog mogelijke bezettingsgraad van produktie-apparatuur.

De hoge betrouwbaarheid en lage onderhoudskosten van Japanse duurzame consumentengoederen nopen de Westeuropese fabrikant een passend antwoord te vinden.

Uit deze drie ontwikkelingen vloeit de vraag voort hoe de onderhoudskosten kunnen worden verlaagd, als onderdeel van het streven naar optimale kosten gedurende de levensduur. Gezien de doelstelling van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek ligt het voor de hand daarbij de mogelijkheden van nieuwe methoden en technieken in kaart te brengen. Tijdens het ontwerpen krijgen de onderhoudskosten meestal onvoldoende aandacht, terwijl de mogelijkheden tot beïnvloeding juist daar het grootst zijn. Benadering van het probleem vanuit het ontwerpen ligt dus voor de hand.

De vraagstelling luidt daarom: Kunnen nieuwe technieken en ontwerpmethoden in de toekomst een bijdrage leveren aan de verlaging van de onderhoudskosten en wat zijn hiervan de gevolgen?

Deze gevolgen kunnen technisch, economisch of maatschappelijk van aard zijn. Hier zullen alleen die nieuwe technieken worden behandeld die door de ontwerper kunnen worden toegepast.

Sommige bedrijfstakken zijn verder gevorderd met de beheersing van de onderhoudskosten dan andere. Door het ontwerpproces op systematische wijze te benaderen, is gepoogd een vergelijking te maken tussen een aantal bedrijfstakken.



## Opbouw van de publikatie

Om de voorgaande vraag te kunnen beantwoorden werden een stuurgroep en zeven werkgroepen gevormd. De samenstelling is in een bijlage gegeven.

De werkgroepen representeren zes bedrijfstakken: de wegebouw, de bouw, de procesindustrie, de vliegtuigindustrie, de kantoorautomatiseringssector en de sector duurzame consumentengoederen.

In hoofdstuk 1 wordt ingegaan op een aantal algemene onderwerpen, namelijk de ontwikkeling van het onderhoud, het begrippenkader, onderhoudsbewust ontwerpen en nieuwe technische ontwikkelingen. De in hoofdstuk 1 gepresenteerde methode voor onderhoudsbewust ontwerpen wordt vervolgens in de hoofdstukken 2 t/m 8 toegepast op het ontwerpproces in de zes bedrijfstakken.

## Conclusies en aanbevelingen

### Algemeen

- Het betrekken van het onderhoud in het ontwerp om tot een beoogde evenwichtige kostenverdeling over de levensduur van industriële kapitaalgoederen te komen, dient te beginnen bij de ontwerpspecificatie, bijvoorbeeld volgens het 'integrated logistic support' concept.
- De in deze publikatie gehanteerde systematische aanpak vormt een hulpmiddel oplossingen te vinden voor een ontwerp waarin optimaal rekening is gehouden met het onderhoud.
- Toestandsafhankelijk onderhoud zal steeds meer binnen bereik komen naarmate de diagnostie technieken zich verder ontwikkelen. Het is zaak de toepassing van deze technieken reeds in de ontwerpfase voor te bereiden.
- Het streven naar verlaging van de onderhoudsinspanning zal in de toekomst leiden tot constructies die steeds minder onderhoud vragen. Daarbij bieden nieuwe materialen of technieken soms oplossingen voor oude problemen, waarin voorheen geen verbetering was te brengen. De gevolgen van deze ontwikkeling zijn tweeledig. Vermindering van de onderhoudsbehoefte leidt tot uitstoot van arbeid. Nieuwe materialen en componenten brengen echter met zich mee dat het onderhouden complexer wordt en meer kennis vereist. Bij elektronica wordt deze kennis veelal in het object ingebouwd, waardoor onderhoud versimpelt tot het verwisselen van componenten. Maar er kunnen ook complexe, moeilijk te analyseren storingen ontstaan die meer dan voorheen de inzet van hoogwaardig technisch personeel vereisen.

- De organisatie- en financieringsstructuur in een bedrijfstak bepaalt in sterke mate of een evenwichtige kostenverdeling over de levensduur wordt nagestreefd.  
Zo wordt in de wegenbouw de totstandkoming van een optimaal resultaat bemoeilijkt omdat het politieke bestuur verantwoordelijk is voor de opdrachten, alsmede door de discrepantie tussen de doelstellingen van opdrachtgever en uitvoerend bedrijfsleven.
- De aandacht voor onderhoudsbewust ontwerpen neemt vanzelf toe in bedrijfstakken waar de ontwerper/fabrikant op het moment van de aankoopbeslissing ook jaarlijkse onderhoudskosten moet noemen (bijvoorbeeld in de vorm van een onderhoudscontract).
- Bij de opleiding van toekomstige ontwerpers dient aan de aspecten bedrijfszekerheid, onderhoudbaarheid en kosten gedurende de levensduur even veel aandacht te worden besteed als aan functie, prestatie, vormgeving en prijs.

### Wegenbouw

- Er is onvoldoende kennis in de verkeerskunde en in de wegenbouw om de kosten van aanleg en onderhoud gedurende de ontwerpperiode te kunnen minimaliseren. Het budget om deze kennis te verwerven, ontbreekt.
- Bij het verlagen van de onderhoudskosten in de wegenbouw is de aandacht vooral gericht op toestandafhankelijk onderhoud (rationeel verhardingsbeheer) en efficiëntere reparatiemethoden.
- Het korte termijn-denken van het voor de opdrachten in de wegenbouw en het wegonderhoud verantwoordelijke politieke bestuur belemmert de rationele keuze van onderhoudsstrategieën. Het is daarom even belangrijk tijdens besluitvormingsprocessen technische inzichten en de financiële consequenties van besluiten (vooral de kostenconsequenties van uitstel van (groot)onderhoud) begrijpelijk en inzichtelijk te maken voor de besturen als ze in technische zin te verdiepen.

### Bouw

- Nieuwe materialen waarvan het gedrag in de tijd moeilijk te bepalen is, veroorzaken een extra handicap bij het realiseren van een onderhoudsbewust ontwerp.
- Het operationeel maken van fundamentele kennis (bijvoorbeeld van bouwfysica) ontbreekt in de bouw.
- De bouw heeft een sterk versnipperde voortbrengingsstructuur. Dit heeft tot gevolg dat kennis van onderhoud onvoldoende wordt teruggekoppeld naar de ontwerper.  
De centrale overheid zou de oprichting van een computerbestand

met gegevens over het gedrag op lange termijn van bouwmaterialen moeten bevorderen. Met deze gegevens kan het exploitatie-tkort in de sociale woningbouw die voor rekening van de centrale overheid komt omlaag worden gebracht.

### **Procesindustrie**

- Roterende machines vergen absoluut en relatief het meeste onderhoud. Het gebruik van microprocessoren voor diagnostisering, berekening van belastingen of verwerking van sensorsignalen kan leiden tot vermindering van dit onderhoud.
- Toepassing van nieuwe materialen leidt in de toekomst tot pompen die minder onderhoud nodig hebben.
- Toepassing van methoden voor onderhoudsbewust ontwerpen kunnen in de procesindustrie reeds op korte termijn leiden tot besparingen in de onderhoudskosten. Bestudering van faalgedrag en van de onderhoudsbehoefte van bestaande installaties verschaft het hiervoor benodigde inzicht. Het rapporteren en verzamelen van onderhoudsgegevens is hierbij essentieel.

### **Vliegtuigbouw**

- Toepassing van geavanceerde elektronica leidt in principe tot verlaging van de onderhoudskosten, maar door de toevoeging van operationele en controlefuncties nemen de onderhoudskosten per saldo niet af.
- De beheersing van onderhoudsaspecten van programmatuur en van door een computer gestuurde functies is nog niet voldoende ontwikkeld.
- Door de strikte veiligheidseisen en de nauwe relatie tussen fabrikant, gebruiker en overheid wordt in de vliegtuigbouw veel aandacht aan onderhoudsaspecten besteed.

### **Kantoorautomatisering**

- Bij kopieerapparatuur zal een verdere verlaging van de onderhoudskosten worden bereikt door het systematisch hanteren van de methoden voor onderhoudsbewust ontwerpen. Ontwikkelingen die hierbij goede mogelijkheden bieden, zijn andere materialen en elektronische meet- en regelinrichtingen. Verder is de aandacht gericht op ondersteuning van de onderhoudstechnicus en op het laten verrichten van onderhoud door de gebruiker. Om dit mogelijk te maken, is de belangstelling gericht op verbetering van diagnose-apparatuur en op centrale diagnose via de telefoon.
- Bij het ontwerpen van tekstverwerkers zal de aandacht vooral zijn

gericht op gebruikersvriendelijkheid en het bestand zijn van de apparatuur tegen foute handelingen van de gebruiker en niet op het onderhoudsarmere maken. Dat bij een storing geen verlies van informatie optreedt, is belangrijker dan de reparatie zelf.

- Kantoorautomatisering innoveert sterk. Nieuwe apparatuur en programma's moeten samen met de oude programma's kunnen worden gebruikt. Het aanpassen van programma's en gegevens is namelijk in het algemeen te duur.
- Bij omvangrijke systemen zal de nadruk vooral liggen op het snel en correct detecteren, diagnostiseren en lokaliseren van fouten. Het optreden van een fout wil zeggen dat het systeem anders reageert dan de klant verwacht; daarom zal veel aandacht moeten worden besteed aan gebruikersvriendelijkheid.

### De wasmachine

- Bij de wasmachine worden twee methoden gehanteerd om het aantal storingen te verminderen, namelijk het systematisch volgen van een aantal machines in de praktijk en de vermindering van het aantal componenten. De verwachting is overigens niet dat de onderhoudskosten nog ingrijpend zullen dalen, omdat ze reeds laag zijn.
- Ontwerpen op technische levensduur is niet zinvol. Ontwerpen op betrouwbaarheid leidt tot lage onderhoudskosten en tot verlenging van de werkelijk bereikte levensduur.

### De auto

- Bij de auto zal de onderhoudsbehoefte nog sterk verminderen (maar niet de onderhoudskosten). Andere materialen, elektronica en toepassing van de principes van onderhoudsbewust ontwerpen maken dit mogelijk.
- Indien de tendens over te gaan op verzinkt staal voor de carrosserie doorzet, zal het gemiddelde van de werkelijk bereikte levensduur van de auto toenemen van 10 tot 15 jaar.
- De invoering van hoogwaardige elektronica in de auto vergt een aanzienlijke aanpassing van de opleiding tot automonteur.

---

# 1. Algemene inzichten en methoden

## 1.1 De ontwikkeling van het onderhoud

Sinds de mensheid zich is gaan bedienen van technische hulpmiddelen, moesten die ook worden onderhouden. Zolang de techniek eenvoudig was en er geen industriële productie bestond, was het onderhoud voor de meeste mensen begrijpelijk en onderscheidde het zich niet wezenlijk van nieuwbouw. Na de industriële revolutie en vooral na de opkomst van de massafabricage is onderhoud wezenlijk van karakter veranderd. Met de komst van mechanische en later elektrische en elektronische apparatuur werden apparaten complexer. Een van de gevolgen was dat de oorzaak en het opheffen van een defect niet meer op het oog zijn te bepalen, maar diepgaande kennis vereisen. Bij elektrische en nog sterker bij elektronische apparatuur kan de oorzaak meestal slechts met meetapparatuur worden vastgesteld. Bij elektronica geldt bovendien dat een storing zich niet van tevoren aankondigt.

Een voorbeeld van deze ontwikkelingsgang is die van het schrijven van brieven. Oorspronkelijk schreef men met een ganzeveer, die door de eigenaar steeds werd aangepunt tot hij op was. Deze werd opgevolgd door de kroontjespen, de vulpen en de schrijfmachine, alle nog te doorgronden door de geïnteresseerde leek en tot slot door de tekstverwerker, waarbij onderhoud alleen door een deskundige kan worden verricht.

Opvallend in deze reeks zijn de toegenomen gebruiksmogelijkheden, de toename in complexiteit en het grillige verloop van de gemiddelde levensduur van de opeenvolgende produkten.

Door massafabricage zijn de produktiekosten sterk gedaald, maar niet de onderhoudskosten. Daardoor is vooral bij consumentenartikelen onderhoud dikwijls duurder geworden dan de aanschaf van een nieuw apparaat. Dit heeft bij duurzame consumentenartikelen geleid tot een onderhoudsarm ontwerp en bij goedkope voorwerpen tot wegwerpartikelen.

De toegenomen complexiteit heeft ontwerpers gedwongen reeds tijdens het ontwerp systematisch aandacht te besteden aan het faaltempo en de behoefte aan preventief onderhoud. In de civiele techniek en de werktuigbouwkunde vertrouwt de ontwerper groten-deels op zijn ervaring, maar een dergelijke aanpak bleek bij elektroni-

ca niet meer toereikend. De nieuwe aanpak in de elektronica heeft tot gevolg dat het faalt tempo sterk is verminderd. Deze afname was zo sterk, dat bij zuiver elektronische apparatuur vrijwel alleen ontwerpfouten en verkeerd gebruik als storingsoorzaak zijn overgebleven als sprake is van normale omgevingscondities. De gedachte dringt zich dan ook op de systematiek uit de elektronica ook toe te passen op meer traditionele vakgebieden. Dit gebeurt slechts schoorvoetend. Een uitzondering vormen bedrijfstakken als de auto-industrie en de vliegtuigbouw, waar een hoge bedrijfszekerheid wordt geëist. Deze aarzeling heeft een aantal redenen. De hoofdreden is veelal dat toepassing van de systematiek veel geld kost, waarvan het rendement niet tevoren vaststaat.

Daarnaast spelen onbekendheid met de systematiek en traditionalisme een rol.

De onderhoudsbehoefte, voortvloeiend uit storingen en de behoefte aan preventief onderhoud vormen een uit zeer veel factoren samengestelde eigenschap van een object. Bovendien is de onderhoudsbehoefte sterk afhankelijk van de gebruiksomgeving, zowel de materiële als de menselijke. Er zijn, in tegenstelling tot bijvoorbeeld energiegebruik, geen analytische methoden om de onderhoudsbehoefte vooruit te bepalen. Het is dus niet mogelijk door meting van een aantal fysische grootheden (zoals de k-waarde bij energie) de onderhoudsbehoefte ondubbelzinnig uit te rekenen. Wel is het mogelijk het object te karakteriseren aan de hand van een aantal parameters en daarmee te komen tot een schatting van de onderhoudskosten. Zo wordt het mogelijk bij het ontwerpen twee uitvoeringsmogelijkheden onderling te vergelijken.

Bijzondere aspecten van het te onderhouden object komen daarin echter veelal niet tot uitdrukking. Bij een object dat in gebruik is, is het wel mogelijk de besparingen op de onderhoudskosten ten gevolge van aanpassingen van het ontwerp met redelijke nauwkeurigheid te berekenen.

Toepassing van methoden uit de elektronica zal overigens in de werktuigbouwkunde en de civiele techniek niet leiden tot het vrijwel elimineren van onderhoud. Degradatieverschijnselen zullen onderhoud nodig maken, behalve bij objecten met beperkte levensduur.

## 1.2 Enkele gebruikte termen

### Onderhoud

Alvorens in te gaan op de technische aspecten van onderhoudsbewust ontwerpen worden eerst enkele termen geïntroduceerd.

Onderhoud wordt in deze publikatie gedefinieerd als de instandhouding van het bestaande ontwerp.

Aanpassingen ten gevolge van een gewijzigde functieervulling vallen dus niet onder het begrip onderhoud. Onderhoud omvat zowel het verhelpen van storingen als het preventief onderhoud.

Van onderhoudsbewust ontwerpen is sprake als tijdens het ontwerpen rekening wordt gehouden met het onderhoudsaspect. Dit leidt tot optimalisering van de onderhoudskosten als onderdeel van de levensduur-, c.q. eigendomskosten. Onderhoudsarm ontwerpen, d.w.z. ontwerpen op hoge bedrijfszekerheid en hoge preventievrijheid, en onderhoudsvriendelijk ontwerpen, d.w.z. ontwerpen op onderhoudbaarheid, zijn onderdeel van onderhoudsbewust ontwerpen.

### **Gebruikskosten**

Elk object brengt voor de bezitter een bepaalde hoeveelheid kosten met zich mee. Als de gebruiksduur en de restwaarde tevoren bekend



Afb. 1.1 Opbouw van de gebruikskosten.

zijn (wat meestal niet zo is), kan het jaarlijkse gemiddelde van deze kosten in theorie worden bepaald.

De opbouw van gebruikskosten is weergegeven in afb. 1.1. Onderhoud wordt in een aantal bedrijfstakken opgesplitst in technisch onderhoud en schoonmaken.

De ontwerper die de onderhoudskosten wil verlagen, beïnvloedt in veel gevallen ook de afschrijving (door een langere levensduur of door een hogere kostprijs). Bovendien beïnvloedt hij ook in vele gevallen de energiekosten. De energiekosten worden in deze publikatie echter slechts in beschouwing genomen indien er een relatie bestaat met onderhoud.

Voorts kan de ontwerper de gevolgschade beïnvloeden, namelijk

- de schade aan het object zelf (interne gevolgschade);
- de kosten van produktiestilstand;
- de eenmalige kosten van catastrofale gevolgen (externe gevolgschade aan personen en omgeving).

De kosten van produktiestilstand zijn geen vast gegeven. Voor een systeem dat continu in bedrijf is, is produktiestilstand altijd nadelig. Voor een discontinu systeem daarentegen zijn er momenten dat de kosten van stilstand vrijwel nihil zullen zijn.

De kosten van produktiestilstand en de externe gevolgschade zijn doorgaans niet in de gebruikskosten begrepen. In deze publikatie worden zij meegenomen als onderdeel van de onderhoudskosten.

### De levensduur van produkten

Omdat de ontwerper die zich bezighoudt met verlaging van de onderhoudskosten soms invloed uitoefent op de levensduur van een object, wordt nader ingegaan op enkele begrippen zoals technische en economische levensduur.

Bij het ontwerpen van produkten gaat de ontwerper uit van een bepaalde levensduur gedurende welke het object moet kunnen blijven functioneren tegen aanvaardbare onderhoudskosten. Dit wordt de *ontwerplevensduur* genoemd.

Het tijdsbestek waarbinnen het object zijn technische functies naar behoren vervult, wordt de *technische levensduur* genoemd [14]. Voor objecten die niet kunnen worden gerepareerd, zoals gloeilampen, is dit een eenduidig begrip. Voor objecten die wel kunnen worden gerepareerd, is deze levensduur in principe oneindig lang. Van een auto is de carrosserie echter een zo wezenlijk onderdeel dat het in ongerede raken hiervan het einde van de technische levensduur betekent.

Als de onderhoudskosten zo hoog zouden worden dat de aanschaf van een gelijkwaardig nieuw object voordeliger is, dan is het einde van de *economische levensduur* bereikt [13]. In de vliegtuigbouw spreekt men van 'economic repair life'.



Bij produktiemiddelen daarentegen wordt de economische levensduur bepaald door de kosten die dit produktiemiddel met zich brengt om goederen van een bepaalde waarde voort te brengen. Indien een technisch geavanceerder produktiemiddel op de markt verschijnt dat lagere kosten met zich brengt, luidt dit het einde in van de economische levensduur.

Bij gebouwen spreekt men, als men behalve de onderhoudskosten ook het verminderen van de bruikbaarheid in de beschouwing betreft, over de *gebruiksperiode*. Als de indeling van een gebouw niet optimaal meer is, ontstaat een zekere ondoelmatigheid in het gebruik. Een ingrijpende verbouwing of een verhuizing kan leiden tot lagere kosten en dan is de gebruiksperiode teneinde. Ook bij auto's en vliegtuigen kent men het begrip gebruiksperiode en wel als deze objecten van eigenaar veranderen (tweede- en derdehands gebruik).

Het einde van de gebruiksperiode houdt niet altijd het einde van de levensduur in. De levensduur bestaat meestal uit een aantal gebruiksperiodes.

Van een aantal objecten worden statistieken bijgehouden over de *werkelijk bereikte levensduur*. Op zich zegt dit getal weinig over de technische of economische levensduur. Bij auto's verdwijnt 25% voortijdig van de weg ten gevolge van een aanrijding. Bij wasmachines leiden vaak niet-technische oorzaken tot afdanken, zoals een verandering in de gezinssituatie of een verbouwing. Bij Nederlandse treinstellen echter is een technische levensduur van dertig jaar als eis in het bestek opgenomen; deze wordt met een tolerantie van vijf jaar aangehouden. In tabel 1.1 zijn enige werkelijk bereikte levensduren vermeld. Indien slechts een getal staat vermeld, is dit een gemiddelde waarde.

Tabel 1.1 Werkelijk bereikte levensduur van enige objecten

object	werkelijk bereikte levensduur in jaren
deklaag van wegen	3-26
woning (hoofddragers)	90
proces-apparatuur	12-30
vliegtuigen	25-40
kantoorapparatuur	3- 5
wasmachine's	12
auto's	9

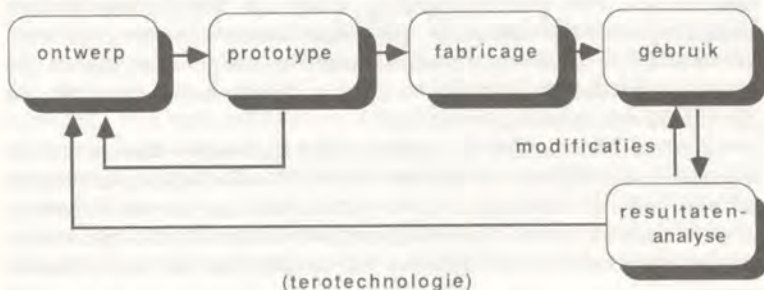
Als de werkelijk bereikte levensduur kort is, zoals bij kantoorapparatuur, dan is dat meestal een teken dat het produkt of de markt sterk

aan verandering onderhevig is. Een veel langere ontwerplevensduur dan vijftien jaar is voor specifieke industriële productie-apparatuur en voor consumentenprodukten meestal niet zinvol. De kans dat het produkt dat met deze productie-apparatuur wordt vervaardigd niet meer wordt gemaakt of dat het technisch concept van het consumentenprodukt is verouderd, wordt dan te groot.

### 1.3 Onderhoudsbewust ontwerpen

#### Inleiding

Het ontwerpen is een van de fasen uit de levenscyclus van een produkt. De diverse fasen zijn aangegeven in afbeelding 1.2



Afb. 1.2 Fasen in de levenscyclus van een object.

De afbeelding geeft een aantal mogelijkheden kennis uit de gebruiksfase te benutten voor verbetering van het ontwerp. Niet alle mogelijkheden worden in alle bedrijfstakken gebruikt. Zo is in de bouw het maken van een prototype ongebruikelijk en worden bij de auto geen modificaties aangebracht door de gebruiker, maar, via terugkoppeling, door de ontwerper.

Het meenemen van het onderhoud in het ontwerp om tot een optimale kostenverdeling over de levenscyclus te komen, vormt een onderdeel van de benadering die wel wordt aangeduid met de benaming terotechnologie.

Een gebruiksgereed produkt heeft een door ontwerp en fabricage bepaalde onderhoudsbehoefte. De daaruit voortvloeiende onderhoudskosten zijn geen vast gegeven, maar kunnen van geval tot geval sterk verschillen. Dit heeft onder andere de volgende oorzaken. De onderhoudskosten worden beïnvloed door het gedrag van de beheerder. Wordt het object beheerd door een bedrijf, dan worden deze kosten vooral bepaald door de doelmatigheid van de onderhoudsor-

ganisatie. Wordt het object beheerd door een persoon (de consument), dan spelen voorlichting, gebruiksaanwijzing, onderhoudsvoorschriften en het onderhoudsgedrag van die persoon een belangrijke rol.

Verbetering van de onderhoudsorganisatie kan vaak worden gerealiseerd met toepassing van algemene inzichten uit de organisatieleer. De invoering van deze inzichten in de organisatie is dan meestal het probleem. Voor onderhoudsbewust ontwerpen is soms diepgaand technisch onderzoek nodig. De resultaten zijn daarentegen vaak blijvender en minder afhankelijk van de situatie omdat het de ingebouwde eigenschappen van het object betreft.

De onderhoudsbehoefte is sterk afhankelijk van de behandeling van het object door de gebruiker en van de omgeving waarin het apparaat functioneert. Het gebruikersgedrag is op zijn beurt onder andere afhankelijk van het feit of de gebruiker tevens eigenaar is of niet. Bovendien neemt de onderhoudsbehoefte in veel gevallen met de tijd toe. De onderhoudsbehoefte hangt dus af van het gedrag van de gebruiker, de omgeving en de tijd.

Door verschillen tussen de onderhoudsorganisaties kan eenzelfde object bij verschillende gebruikers verschillende onderhoudskosten hebben. Uit de hoogte van de onderhoudskosten in een bepaalde situatie kunnen dus niet zonder meer conclusies worden getrokken over de kwaliteit van het ontwerp ten aanzien van het onderhoudsaspect.

In het nu volgende worden de onderhoudsorganisatie en de individuele gebruiker slechts in de beschouwing betrokken voor zover de ontwerper daarmee rekening dient te houden. De organisatieaspecten (mensen, middelen en procedures) worden buiten beschouwing gelaten. Evenmin wordt meer dan incidentele aandacht besteed aan het begrip kwaliteit in de ontwerpfase (worden procedures gevolgd enz.).

In veel gevallen wordt de onderhoudsproblematiek in het ontwerp intuïtief benaderd. Alvorens in te gaan op nieuwe technische ontwikkelingen, worden eerst de fasen van het ontwerpen behandeld en daarna een schema dat de ontwerper behulpzaam kan zijn het onderhoud op systematische wijze te benaderen.

In het tot stand komen van een gereed ontwerp kunnen globaal drie fasen worden onderscheiden:

- het maken van de ontwerpspecificatie;
- het maken van het ontwerp dat voldoet aan de specificaties;
- de beoordeling van het ontwerp, de fabricage en het beproeven van het prototype.

## De fasen in het tot stand komen van het gereed ontwerp

### *De ontwerpspecificatie*

De ontwerpspecificaties komen in de diverse bedrijfstakken op verschillende manieren tot stand. Soms, zoals in de wegenbouw, schrijft de opdrachtgever een bestek waarin de belangrijkste specificaties zijn vermeld. Bij consumentenartikelen daarentegen is het de marketingafdeling die de ontwerpspecificaties formuleert.

Ontwerpspecificaties hebben in eerste instantie betrekking op het prestatieniveau: het aantal passagiers, het vermogen van een motor, de acceleratie van een auto. Daarnaast worden veelal eisen ten aanzien van veiligheid, ergonomie, uiterlijk en milieuvervuiling geformuleerd.

Een aantal eisen zal echter betrekking hebben op faalt tempo, levensduur en onderhoud.

De eisen omtrent levensduur kunnen zijn gerelateerd aan de tijd of aan het gebruik. Zo kan van de carrosserie van een auto worden geëist dat deze na een bepaald aantal jaren nog geen zichtbare roest vertoont. Van een schakelaar kan worden geëist dat deze onder nominale belasting een bepaald aantal schakelingen kan verrichten. Minder goed in getallen uit te drukken, maar wel belangrijk voor het uiteindelijk succes, is het imago van het produkt bij de klant. Het prestatieniveau wordt afgewogen tegen de gebruikskosten. Doel van de ontwerper moet zijn een zo hoog mogelijke prestatie/prijsverhouding.

Ontwerpspecificaties zijn zelden zo volledig dat ze alle eigenschappen van een produkt volledig vastleggen. De vele cartoons over wat de klant had gevraagd en wat de ontwerper er van had gemaakt, zijn daarvan het bewijs.

Ontwerpspecificaties evolueren over het algemeen met de tijd. Daaraan liggen zowel geleidelijke verbeteringen in het ontwerp als nieuwe technieken ten grondslag. Deze ontwikkeling vindt plaats omdat een geringe onderhoudsbehoefte en een lange levensduur redenen kunnen zijn juist dat produkt te kopen. De klant laat zich in het algemeen leiden door een mengeling van kwaliteit van de functie vervulling, kosten gedurende de levensduur en beschikbaarheid. Bij consumentengoederen is de aanschafprijs veelal doorslaggevend.

### *Het ontwerpen*

Liggen de ontwerpspecificaties eenmaal vast, dan kan de ontwerper – althans in theorie – kiezen uit een aantal mogelijkheden om aan deze specificaties te voldoen. Omdat de tijd ontbreekt deze mogelijkheden te evalueren, maakt hij gebruik van ontwerpstrategieën om tot een

optimaal ontwerp te komen. In de praktijk houdt dit in dat hij zich het liefst baseert op eerdere ontwerpen.

Zijn ervaring is hem behulpzaam bij het creëren van een goed werkende oplossing en het vermijden van zaken die een goed functioneren in de weg staan. Wezenlijke aanpassingen in het concept worden in veel gevallen gerealiseerd door de researchafdeling en niet door de ontwerpafdeling. Vaak speelt bij de keuzen die de ontwerper maakt een aantal eigenschappen van het produkt een rol, waaronder de onderhoudsbehoefte.

Een ontwerper bepaalt eerst de werkwijze van het object (bijvoorbeeld een benzinemotor of een dieselmotor). Vervolgens kiest hij een aantal componenten die de vereiste functie kunnen vervullen en als laatste stap legt hij plaats en dimensionering van die componenten vast. Er is een duidelijk verschil tussen het ontwerpen op systeemniveau en dat op componentniveau. Voor componenten moet men vaak kiezen uit een standaardreeks. Een dergelijke component kan om die reden overgedimensioneerd zijn.

Het doel van de ontwerper is een object te ontwikkelen dat de gevraagde functie vervult. Bij zijn keuze legt hij echter ook de storingsoorzaken en degradatieprocessen vast waaraan het object onderhevig is.

Door bijvoorbeeld te kiezen voor een elektronische in plaats van een mechanische onderbreker voor de ontsteking van een auto, vermijdt de ontwerper slijtage en inbranden als oorzaak van onderhoud.

Behalve de storingsoorzaken, legt de ontwerper – bewust of onbewust – de onderhoudbaarheid vast door al dan niet te voorzien in eenvoudige en eenduidige diagnose- en herstelmogelijkheden.

#### *De beoordeling van het ontwerp*

De onderhoudsbehoefte is een eigenschap van het produkt die bestaat uit een groot aantal deeleigenschappen. De ontwerper heeft getracht zich van deze eigenschappen en de omgeving waarin het produkt moet functioneren een zo goed mogelijk beeld te vormen met behulp van de specificaties en zijn eigen kennis. Zijn kennis is echter zelden toereikend. Uiteindelijk kan alleen beproeving in de praktijk de bevestiging leveren dat het ontwerp voldoet. Aangezien bij een gebrek in het ontwerp de kosten van verhelpen erg hoog zijn, kunnen een beoordeling van het ontwerp op de tekenplank en een prototype-beproeving hulpmiddelen zijn om een dergelijk gebrek te vermijden. Functioneert het produkt eenmaal in de praktijk dan is een goede en systematische terugkoppeling van onderhoudsgegevens essentieel om tot verbetering van het ontwerp te komen.

De kans op fouten wordt extra groot als een nieuwe technische oplossing wordt gekozen. Een van de redenen is vaak dat de oude oplossing een bepaalde eigenschap impliciet in zich had die niet als

zodanig werd onderkend. Een aardig voorbeeld hoe men een dergelijke eigenschap over het hoofd kan zien, zijn de nieuwe gevechtspakken die recent zijn ontwikkeld. Voor de sluitingen is gebruik gemaakt van klitteband. Dit lost weliswaar het probleem van afgerukte knopen op, doch blijkt in sommige situaties een onaanvaardbare hoeveelheid lawaai op te leveren.

### Methoden voor onderhoudsbewust ontwerpen

De ontwerper die er naar streeft de kosten van onderhoud en stilstand voor de gebruiker zo laag mogelijk te maken, heeft de volgende strategieën tot zijn beschikking.

- A Verlaag het faalt tempo van componenten van het object;
- B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur van de componenten;
- C Verlaag de kosten van instandhouding en herstel;
- D Verminder de gevolgschade van een storing.

Een indeling van deze strategieën is weergegeven in afb. 1.3.

Elk der genoemde methoden wordt nu kort toegelicht.

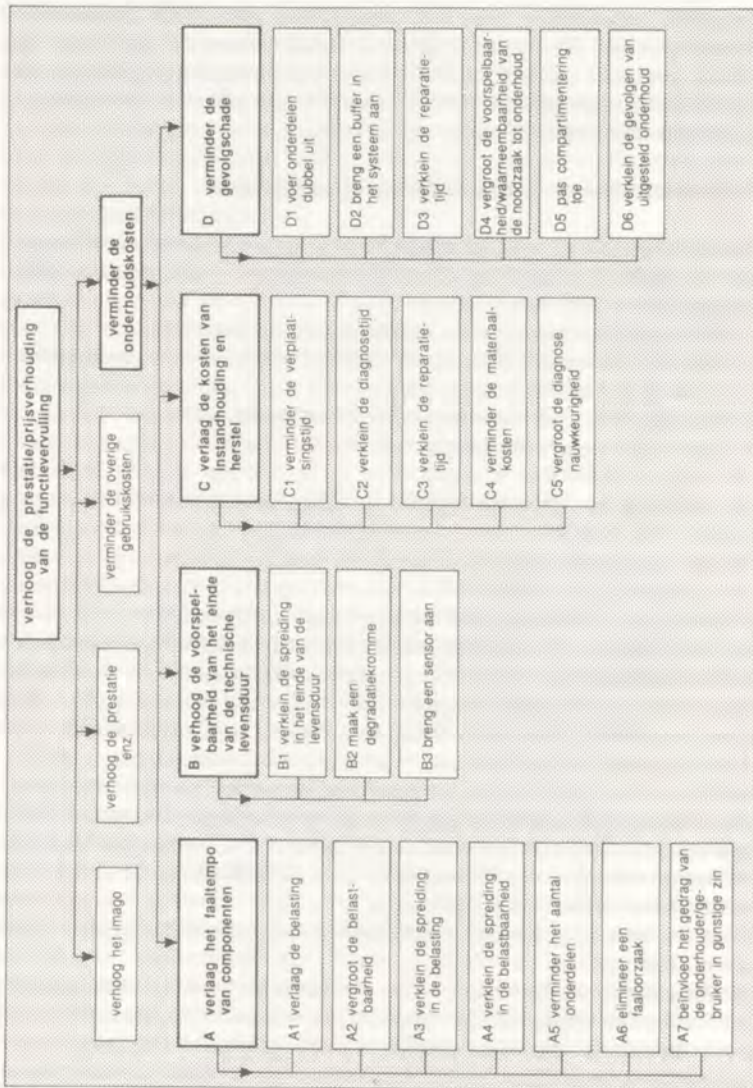
#### *A Verlaag het faalt tempo van componenten van het object*

Om het falen van een object te beschrijven, wordt kort ingegaan op de waarschijnlijkheidsleer [7]. In een groot aantal gevallen faalt een object omdat de erop uitgeoefende belasting groter is dan de belastbaarheid. Deze opmerking zou betrekkelijk triviaal zijn als belasting en belastbaarheid een vaste waarde bezaten. Dan zou, als de belastbaarheid groter is dan de belasting, het object nooit falen. Door verschillende gebruikssituaties, door onnauwkeurigheden in de fabricage en door degradatie treden met een bepaalde waarschijnlijkheid een aantal waarden van belasting en belastbaarheid op. In afb. 1.4 is deze kansverdeling weergegeven.

Belanden belasting en belastbaarheid in het gearceerde gebied dan treedt falen op.

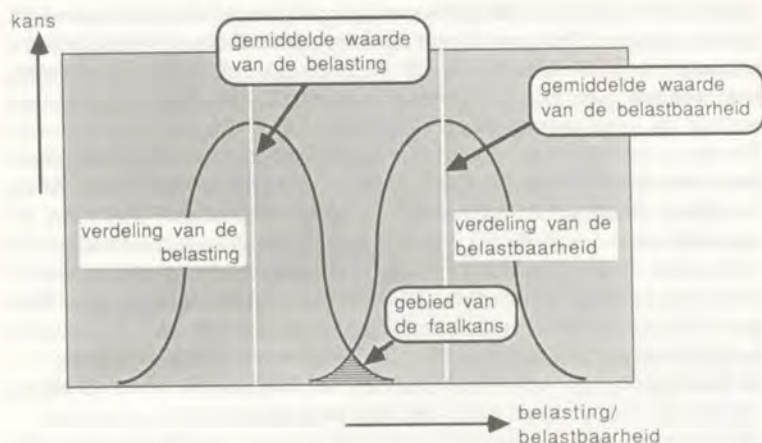
De definitie van faalt tempo luidt: de kans dat een component of systeem na een bepaalde tijdsduur een storing zal vertonen indien het onder bepaalde omstandigheden wordt gebruikt. Het begrip is eenvoudig te begrijpen in het bijzondere geval dat het faalt tempo constant is. Treden aan een repareerbare component gedurende een periode  $t$  een aantal storingen op, dan is het faalt tempo gelijk aan het aantal storingen gedeeld door de lengte van die periode ( $n/t$ ). De dimensie is dus ( $1/tijd$ ) [6].

Onder falen wordt ook verstaan de noodzaak gebruiksaafhankelijk onderhoud te plegen zoals schilderen of olie verversen. De verf



Afb. 1.3 Strategieën voor onderhoudsbewust ontwerpen.

beschermt niet meer voldoende. De smerende eigenschappen van de olie zijn onvoldoende geworden voor een juiste functievvulling.



Afb. 1.4 Kansverdeling van belasting en belastbaarheid.

#### *A1 Verlaag de belasting*

Een voor de hand liggende methode om het faalt tempo te verlagen, is het verlagen van de gemiddelde waarde van de optredende belastingen.

Onder belasting worden verstaan alle op het object werkende belastingen, zoals trillingen en temperatuurvariaties. Zo kan bijvoorbeeld door koelen het faalt tempo worden gereduceerd.

#### *A2 Verhoog de belastbaarheid*

De ontwerper kan de gemiddelde belastbaarheid vergroten.

Door bijvoorbeeld een oppervlak gladder te maken kan slijtage worden verminderd. Wel moet worden opgemerkt dat verhoging van de belastbaarheid in veel gevallen een zwaarder en dus duurder ontwerp betekent. Bovendien is zo'n verhoging niet altijd mogelijk omdat dan weer andere problemen optreden. Door bijvoorbeeld een grotere isolatiedikte toe te passen bij de geleiders in elektrische machines wordt de kans op aardsluiting verminderd. De warmteoverdracht van de geleider naar het blikpakket wordt echter ook slechter. De stroom door de geleider moet dan worden begrensd om de temperatuur van de isolatie niet te hoog te laten oplopen. Om deze reden zijn de nu volgende methoden vaak interessanter.

#### *A3 Verklein de spreiding in de belasting*

Mogelijkheden hiertoe zijn afhankelijk van de kennis van het belastingsspectrum en de kennis van de grootte van de inwendige belastingen die bij dit spectrum horen. Daarvoor is het kennen en



specificeren nodig van alle uitwendig op de componenten uitgeoefende belastingen. Dus niet alleen de nominale belasting behorende bij normaal bedrijf, maar ook de belastingen bij starten, stoppen, calamiteiten, enz. Dit vergt kennis van het normale gebruikersgedrag en van de gebruiksomgeving.

De ontwerper dient in staat te zijn deze gespecificeerde belastingen te herleiden tot de inwendige belastingen op de componenten en de op de delen daarvan werkende belastingen waaronder trillingen en warmteschok en zich rekenschap te geven van tijdsafhankelijke invloeden zoals vervuiling, slijtage, veroudering, erosie en corrosie. Een tweede mogelijkheid om de spreiding in de belasting te verkleinen, is het voorkomen dat belastingen als gevolg van inadequate bedrijfsvoering te hoog worden. Bedoeld wordt het voorkomen van bedieningsfouten, gebrekkig onderhoud, ontoereikende bewaking, onnauwkeurigheid van meet- en regelapparatuur.

Bedieningsfouten kunnen bijvoorbeeld worden voorkomen door het aanbrengen van vergrendelingen.

#### *A4 Verklein de spreiding in de belastbaarheid*

De hiervoor benodigde maatregelen zijn voornamelijk de zorg van de ontwerper/fabrikant. Zij kunnen worden onderscheiden naar technische en organisatorische maatregelen.

Technische maatregelen zijn gericht op het kennen van de belastbaarheid van alle kritische delen van componenten in geleverde toestand. Met nadruk wordt hier de geleverde toestand genoemd, omdat de belastbaarheid behalve door het ontwerp ook sterk door de fabricage wordt beïnvloed.

Voorbeelden van technische maatregelen zijn:

- Juiste keuze van materialen (en -combinaties) qua sterkte en eigenschappen (erosie, corrosie, lektheid).
- Adequate constructie en vormgeving ter voorkoming van spanningsconcentraties, trillingen enz. Hier bieden de moderne reken-technieken zoals de eindige elementenmethode mogelijkheden tot nauwkeurige bepaling van de belastbaarheid. Voor de juiste toepassing daarvan is kennis vereist van modelwetten, bezwijkmechanismen en beoordelingscriteria.
- Gebruik van kennis over faalmechanismen en de hiervoor toelaatbare grenzen (kruip, vermoeiing, breukmechanica, slijtage, erosie, corrosie).
- Geavanceerde fabricagetechnieken en -middelen.
- Gebruik van ervaring met betrekking tot ontwerpen, fabriceren en bedrijfsvoering (dit laatste door terugkoppeling uit de praktijk).
- Verhoging van de kwaliteit en intensiteit van controles om het produkt aan het bestek/ontwerp te toetsen (ingangscntrole, destructief en niet-destructief onderzoek tijdens en na fabricage).

Met organisatorische maatregelen worden alle structurele maatregelen bedoeld die rondom het proces van de totstandkoming van het produkt moeten worden getroffen. Dit betreft zowel het ontwerpen als de fabricage. Hierdoor wordt de zekerheid vergroot dat het produkt aan de specificaties voldoet.

Voorbeelden hiervan zijn:

- Systematisch ontwerpen door toepassing van technieken zoals betrouwbaarheidsanalyse en 'failure mode and effect analysis'.
- Communicatie tussen gebruiker en ontwerper/fabrikant ter terugkoppeling van praktijkervaringen.
- De aanwezigheid van een kwaliteitswaarborgsysteem en de toepassing daarvan tijdens het gehele proces van de totstandkoming van het produkt om te bereiken dat alles verloopt conform procedures en afspraken. Hieronder vallen onder andere de aanwezigheid en consequente toepassing van ontwerp- en fabricagevoorschriften.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Voor een object waarbij alle componenten moeten functioneren opdat het object werkt, geldt dat de bedrijfszekerheid gelijk is aan het produkt van de bedrijfszekerheden van alle componenten. Het is duidelijk dat elke extra component het faaltempo vergroot.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

In een aantal gevallen is het mogelijk een faaloorzaak te elimineren. Zo kan, door een onderdeel in een luchtdichte behuizing onder te brengen of in te gieten, de inwerking van vocht vrijwel worden geëlimineerd. In feite is dit een extreem geval van het vergroten van de belastbaarheid.

Ook kan men een onderdeel dat onderhevig is aan slijtage zelfnastelend maken.

#### *A7 Beïnvloed het gedrag van de gebruiker/onderhouder in gunstige zin*

Door het verschaffen van informatie aan de gebruiker/onderhouder kan de ontwerper de betrouwbaarheid in gunstige zin beïnvloeden.

#### *B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur*

Bij verschijnselen als vermoeiing en slijtage treedt na enige tijd een sterke stijging van het faaltempo op. Kosten, vooral door gevolgschade, kunnen worden vermeden door de betreffende component te vervangen op een voor de bedrijfsvoering geschikt tijdstip, kort voordat de component faalt. Daarvoor moet het tijdstip van falen goed voorspelbaar zijn.

*B1 Verklein de spreiding in het einde van de levensduur*

Een methode om de voorspelbaarheid te verhogen, is te zorgen dat een aan degradatie onderhevige component steeds na eenzelfde tijd het einde van zijn levensduur bereikt (bij dezelfde omgevingscondities).

Bij een groot aantal producten is dit echter niet haalbaar. In dat geval kan het interessant zijn het einde van de levensduur meetbaar te maken, door regelmatige visuele inspectie of door middel van een sensor met signaleringssysteem.

*B2 Maak een degradatiekromme*

Soms is het mogelijk bijvoorbeeld door de inspectie op scheurvorming en vaststelling van de scheurgrootte, een uitspraak te doen over de waarschijnlijkheid van het optreden van breuk.

Voor de vervaardiging van dergelijke krommen moeten de gebruiksin tensiteit en de gebruiksomgeving bekend zijn. Voor elke gebruiksomgeving gelden andere levensduren.

*B3 Breng een sensor aan*

Vaak is het degradatieproces niet direct visueel waarneembaar. Een sensor met signaleringssysteem kan dan uitkomst brengen. Metingen worden meestal verricht aan een van de volgende grootheden:

- de prestatie van het object;
- verontreiniging of degradatie van vloeistofsystemen (metaaldeeltjes in de smeerolie kunnen wijzen op overmatige slijtage);
- het dynamisch gedrag; een defecte component leidt tot een gewijzigd trillingspatroon en soms kan uit de aard van de verandering worden geconcludeerd welke component defect is.

*C Verlaag de kosten van instandhouding en herstel*

Treedt een storing op of moet er gebruiksafhankelijk onderhoud worden gepleegd, dan ontstaan de volgende kosten: verplaatsingskosten van de onderhoudsmonteur, kosten van diagnostiseren en kosten van herstel of gebruiksafhankelijk onderhoud. Om deze kosten te verminderen, kunnen de volgende methoden worden toegepast.

*C1 Verminder de verplaatsingstijd*

Om onderhoudsmonteur en object bijeen te brengen is tijd nodig. Soms kan langs telecommunicatieverbindingen een reservecircuit worden ingeschakeld, zoals bij computers en telefooncentrales. Bij consumentenproducten kan de reistijd van de monteur worden geëlimineerd door het onderhoud door de klant te laten verrichten. De klant moet dan wel worden geïnstrueerd, liefst met behulp van diagnose-apparatuur, eventueel in combinatie met instructie door de telefoon.

*C2 Verklein de diagnosetijd*

Door training van de onderhoudsmonteur of door het aanbrengen van diagnose-apparatuur kan de tijd die nodig is voor het vaststellen van de oorzaak en het localiseren van de storing worden bekort. Diagnose is eenvoudiger naarmate de relatie tussen symptoom en foutoorzaak duidelijker te leggen is. De ontwerper kan daaraan bijdragen door deelprocessen of componenten af te schermen tegen elders optredende fouten.

*C3 Verklein de reparatietijd*

Door ervoor te zorgen dat componenten gemakkelijk verwisselbaar zijn, kan de reparatietijd worden bekort. Wanneer de reis- of voorbereidingstijd een relatief groot deel uitmaakt van de totale onderhoudstijd kan het zinvol zijn de onderhoudsintervallen van de onderdelen op elkaar af te stemmen.

*C4 Verminder de materiaalkosten*

Door het object modulair op te bouwen, kunnen te hoge materiaal-kosten bij vervanging worden vermeden.

*C5 Vergroot de diagnose-nauwkeurigheid*

Door een betere afstemming tussen het niveau van de onderhoudsmonteur en de diagnosemogelijkheden van het apparaat wordt de kans vergroot dat de gestelde diagnose juist is. Ook bij intermitterende storingen wordt de kans vergroot dat de oorzaak van de storing kan worden vastgesteld.

De afstemming tussen kundigheid van de storingsmonteur en de diagnostische hulpmiddelen moet economisch worden geoptimaliseerd. Gaat men uit van een monteur van hoog niveau en weinig diagnostische hulpmiddelen, dan zullen de loonkosten bij herstel hoog zijn. Brengt men meer diagnostische hulpmiddelen aan, dan zijn de loonkosten bij herstel laag, maar men moet uiteraard investeren in apparatuur.

De extreme vorm hiervan is de voorziening met zodanige diagnosefaciliteiten dat de klant het onderhoud kan verrichten.

*D Verminder de gevolgschade*

Storingen en het plegen van gebruiksafhankelijk onderhoud kunnen leiden tot kosten van produktiestilstand. Storingen kunnen bovendien leiden tot eenmalige kosten van catastrofale gevolgen. Dit betreft zowel schade aan het object zelf als schade aan de omgeving. Om deze kosten te verminderen of te vermijden, kunnen de volgende methoden worden gehanteerd.

*D1 Voer onderdelen dubbel uit*

Door onderdelen dubbel uit te voeren, kan worden voorkomen dat een storing in een component of gebruiksfafhankelijk onderhoud daaraan er toe leidt dat het totale object gestoord of buiten bedrijf raakt.

*D2 Breng een buffer in het systeem aan*

Door het aanbrengen van buffervoorraden tussen de opeenvolgende stappen van een proces kan worden voorkomen dat het gehele object verstoord raakt als ergens in het proces een hapering optreedt. De buffer bestaat uit het te transporteren of te bewerken goed. Een deel van de procesketen kan gestoord zijn zonder dat de productie tot staan komt. De drinkwatervoorziening bijvoorbeeld kan bij verontreiniging van het oppervlaktewater ongestoord voortgang vinden als er een spaarbekken is.

*D3 Verklein de reparatietijd*

Het is duidelijk dat door het bekorten van de reparatietijd de kosten van produktiestilstand kunnen worden beperkt.

*D4 Vergroot de voorspelbaarheid/waarneembaarheid van de noodzaak tot onderhoud*

Naarmate onderhoud beter voorspelbaar wordt, kunnen kosten worden vermeden. Voor systemen die continu in bedrijf zijn, kan in elk geval de voorbereidingstijd korter zijn, omdat alle onderdelen reeds klaar liggen. Bij discontinue systemen kan het onderhoud worden verricht op een tijdstip dat het object buiten bedrijf is. Voor het voorkomen van catastrofale gevolgen is de voorspelbaarheid zo mogelijk nog belangrijker.

*D5 Pas compartimentering toe*

Er moet worden voorkomen dat een storing in een component ook andere componenten doet overlijden. Een bekend voorbeeld zijn smeltveiligheden in elektrische circuits. Een variant van deze methode is te zorgen dat bij een storing in een component het object nog op beperkte schaal kan functioneren tot reparatie kan plaatsvinden (tot bijvoorbeeld een auto een reparatiewerkplaats kan bereiken).

*D6 Verklein de gevolgen van uitgesteld onderhoud*

Als van de beheerder niet mag worden verwacht dat hij zich aan de voorgeschreven onderhoudsintervallen houdt, of als een zekere flexibiliteit in de onderhoudsplanning wenselijk is, moet de degradatie geleidelijk verlopen. In de angelsaksische literatuur heet dat 'graceful degradation'. Als onderhoud echter zeer lang kan worden uitgesteld zonder dat het object in het ongereede raakt, bestaat het

gevaar dat het onderhoud achterwege wordt gelaten. Als dan herstel nodig is, kunnen de kosten onevenredig hoog zijn.

Vaak komt de ontwerper niet toe aan een bewuste afweging van deze alternatieven. Voor een systematische inventarisatie van het storingsgedrag en de te verwachten onderhoudsbehoefte zijn in de luchtvaart methoden als 'Failure Mode and Effect Analysis' (FMEA) en 'Maintenance Steering Group' (MSG) ontwikkeld. FMEA wordt ook in de auto-industrie gebruikt. In veel bedrijfstakken ervaart men een dergelijke methodiek echter als te duur en tijdrovend. In veel gevallen hanteert men per component een controlelijst van zaken waaraan moet worden gedacht.

Om enigermate systematisch om te gaan met de in afbeelding 1.3 geschetste mogelijkheden kan de ontwerper een object verdelen in functies en zich per functie afvragen wat elk der strategieën aan verbetering te weeg kan brengen. Een voorbeeld voor de personenauto is weergegeven in afbeelding 1.5.

FUNCTIEGROEPEN (*)							
	1	2	3	4	5	6	7
verlaag het faalt tempo							
verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur							
verlaag de kosten van instandhouding en herstel							
verminder de gevolgschade							

- (\*) 1 Het remsysteem                                   5 De aandrijflijn  
 2 De stuurinrichting                                  6 De motor  
 3 De carrosserie                                       7 De transmissie  
 4 Het elektrisch systeem

Afb. 1.5 Diagram voor beslissingsanalyse.

Omdat een wijziging zelden uitsluitend verbeteringen met zich brengt, zal de ontwerper de voor- en nadelen moeten afwegen. Daarbij kan hij zich bedienen van multicriteria- of beslissingsanalyse. Voor de

mogelijke opties die in afbeelding 1.5 naar voren zijn gebracht zal hij de voor- en nadelen op een rij moeten zetten en deze – eventueel met gebruik van weegfactoren – tegen elkaar afwegen.

Zo kan met het aanbrengen van een sensor overbodig gebruiksafhankelijk onderhoud worden vermeden. Daar staat tegenover dat een component wordt toegevoegd, hetgeen de kostprijs en de kans op storingen in principe verhoogt.

De toepassing van een draaistroomaandrijving verlaagt in trams en treinen het onderhoud aan schakelaars en motoren (minder schakelaars, geen collector). Daarvoor komt echter ander onderhoud terug in de vorm van reiniging van luchtfilters in het koelcircuit van de vermogenselektronica.

De hogere kostprijs van een draaistroomaandrijving wordt gecompenseerd door het lagere energiegebruik.

Door elke optie systematisch te evalueren, tracht men tot een zo gunstig mogelijke keuze te komen. Bij nieuwe ontwikkelingen moet de ontwerper wel bedenken dat kostprijs en faaltempo geen vast gegeven zijn. Zo is de elektronische ontsteking in auto's pas na een lange ontwikkeling betrouwbaarder geworden dan de mechanische. Bij de afweging zullen de potentiële mogelijkheden van een techniek moeten worden meegewogen en niet alleen de huidige mogelijkheden

### Storingsoorzaken

Een zinvolle toepassing van afbeelding 1.3 is alleen mogelijk als de voornaamste storingsoorzaken bekend zijn. Deze kunnen in volgorde van belangrijkheid worden weergegeven in een zogenaamd Pareto-diagram. Gegevens over storingsoorzaken zijn vaak schaars en moeten, indien ze bekend zijn, met de nodige behoedzaamheid worden gehanteerd. Storingsoorzaken kunnen worden onderscheiden naar

- fouten in de specificatie, dat wil zeggen de specificatie dekt de werkelijke bedrijfsomstandigheden niet of is onvolledig;
- ontwerpfouten: het ontwerp voldoet niet aan de specificatie;
- fabricagefouten;
- bedieningsfouten;
- fouten bij het uitvoeren van onderhoudswerkzaamheden;
- overige oorzaken.

Deze laatste kunnen zijn:

- storingen waarvan het faaltempo duidelijk toeneemt vanaf een bepaald tijdstip (degradatie, zoals corrosie, vermoeiing en slijtage);
- storingen met een constant faaltempo; deze treden op als er

willekeurige belastingspieken optreden of als het optreden van storingen onder constante belasting willekeurig is gespreid in de tijd of als het object uit verscheidene componenten bestaat met een willekeurig eigen storingsgedrag.

Afhankelijk van het soort object overheersen bepaalde typen storings-oorzaken.

In deze publikatie wordt vooral aandacht besteed aan storingen die in ieder geval optreden, ook als er geen fabricage- of bedieningsfouten worden gemaakt. Daarbij zal ook worden ingegaan op de onvolledige specificatie, omdat 'onvermijdelijke' fouten vaak ontstaan als gevolg van onvoldoende kennis van de praktijkomstandigheden.

#### 1.4 Nieuwe technische ontwikkelingen

Een onderhoudsbewust ontwerp is aan verandering onderhevig. Door nieuwe technische ontwikkelingen ontstaan mogelijkheden het ontwerp te verbeteren of aan te passen. Deze worden nu kort genoemd met verwijzing naar afb. 1.3.

##### *Materialen*

Nieuwe produktietechnieken en nieuwe materialen maken het mogelijk de belastbaarheid te verhogen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het verzinken van de autocarosserie. Bij toepassing van kunststoffen wordt corrosie zelfs volledig opgeheven (elimineer een faaloorzaak). Overigens verouderen kunststoffen wel, onder andere onder invloed van zonlicht.

Toepassing van glasvezelkabels maakt het mogelijk het aantal tussenversterkers in telefoonnetten te verminderen. Deze tussenversterkers zijn (naast draglines) een voorname bron van storingen.

##### *Elektronica*

Door het toepassen van elektronische in plaats van mechanische systemen vervalt slijtage als bron van onderhoud (elimineer een faaloorzaak).

Toepassing van een microprocessor biedt mogelijkheden voor verbeterde diagnose en gegevensopslag. Door met een microprocessor niet-lineaire signalen te lineariseren, wordt toepassing mogelijk van eenvoudige sensoren met een niet-lineair uitgangssignaal. Een andere toepassing van een microprocessor is het op afstand verstellen van een meetbereik.

Een derde mogelijkheid berust op het feit dat een microprocessor geheugen- en reken capaciteit bezit. Daardoor kan bij de beveiliging



van een object de voorgeschiedenis nauwkeurig worden meegenomen. Bijvoorbeeld of een motor een warme of een koude start maakt. Bij een koude motor is de toelaatbare temperatuurverhoging uiteraard groter dan bij een warme motor. Een traditionele overstrombeveiliging weet echter niet of de motor warm of koud is. Indien de motor een aantal malen achter elkaar aanloopt, koelt de overstrombeveiliging vanwege zijn kleinere tijdconstante sneller af dan de motor. Dit kan tot gevolg hebben dat de toelaatbare wikkelingtemperatuur wordt overschreden. Een microprocessor kan dit met behulp van de motorstroom en een model voor het thermisch gedrag uitrekenen en vermijden (verminder de spreiding in de belasting).

#### *Toepassing van andere fysische principes*

Door krachten niet mechanisch, maar magnetisch over te brengen, kunnen faaloorzaken zoals slijtage worden opgeheven. Een voorbeeld is de magnetische koppeling bij procespompen, waardoor slijtage aan asafdichtingen wordt geëlimineerd. Magneet zweeftreinen zijn een ander voorbeeld. In Newcastle on Tyne is een dergelijk systeem operationeel. Bij lage snelheden zoals bij deze zweeftrein, is het onderhoudsvoordeel niet gelegen in vermindering van slijtage, maar in de mogelijkheid de sturing van de aandrijving niet in het voertuig, maar in het onderstation te plaatsen, waardoor de bereikbaarheid sterk verbetert.

Toepassing van digitale in plaats van analoge elektronica maakt het mogelijk deze elektronica zelfcorrigerend te maken. Daardoor kunnen effecten van veroudering in componenten worden gecompenseerd (elimineer een faaloorzaak). Bovendien kan de tijd die voor de diagnose nodig is door toepassing van digitale systemen sterk worden vermindert.

#### *Vermindering van het aantal onderdelen*

Boothroyd heeft een systematiek ontwikkeld om het aantal onderdelen van een object te verminderen [56]. Vooral bij duurzame consumptiegoederen wordt deze met succes toegepast.

#### *Nieuwe rekenmethoden*

Nieuwe rekentechnieken maken het mogelijk beter dan vroeger de belastingstoestand in mechanische constructies op elke plaats en op elk tijdstip te bepalen (verminder de spreiding in de belastbaarheid).

#### *Materiaalonderzoek*

Door onderzoek bijvoorbeeld naar het vermoeiingsgedrag van materialen, wordt een betere voorspelling van de technische levensduur mogelijk.

*Diagnose-apparatuur*

Bij complexe elektromechanische apparatuur kan de microprocessor een hulpmiddel zijn bij het diagnostiseren. Het geheugen van de microprocessor geeft de mogelijkheid waarden van parameters over een bepaalde periode vast te leggen. Bovendien kan in de microprocessor een programma worden ingebouwd waarmee in een bepaalde cyclus alle schakelingen worden beproefd op hun juiste werking (verklein de diagnosetijd, vergroot de diagnosenauwkeurigheid). Een nieuwe ontwikkeling vormen zogenaamde expertsystemen. Een expertsysteem is een computerprogramma dat de redeneringen nabootst van een ervaren onderhoudsmonteur die een storing moet opheffen.

*Onderhoud op afstand*

Bij computers en informatiesystemen is het mogelijk via telecommunicatieverbindingen diagnose te stellen en een reservecomponent in te schakelen (verminder de verplaatsingstijd van de monteur).

*Computers*

Door hun mogelijkheid onderhoudsgegevens vast te leggen, bieden computers de gelegenheid meer inzicht te krijgen in de faaloorzaken en de faalverdeling bij een groot aantal componenten. Hiermee kunnen verbeteringen in het ontwerp en een verbeterde onderhoudsbeheersing worden gerealiseerd. Anderzijds kost deze registratie van onderhoudsgegevens veel geld. Het op juiste wijze vastleggen van storingsoorzaken en het inzichtelijk maken van de opgeslagen informatie zijn onderwerpen waaraan veel aandacht moet worden besteed.

Aan de hand van afbeelding 1.3 en hetgeen is gezegd over nieuwe technische ontwikkelingen, wordt in de hoofdstukken 2 - 8 nagegaan welke mogelijkheden er in een aantal bedrijfstakken zijn tot vermindering van de onderhoudskosten. Achtereenvolgens worden beschouwd de wegenbouw, de bouw, de procesindustrie, de vliegtuigbouw, de sector kantoorapparatuur en de sector duurzame consumentengoederen. De sector duurzame consumentengoederen is gesplitst in twee hoofdstukken, een over de wasmachine en een over de personenauto.

---

## 2. Wegenbouw

### 2.1 Inleiding

Onderhoud aan wegen kost de Nederlandse samenleving jaarlijks ca. twee miljard gulden [23]. Beheersing en verlaging van deze kosten is dus een interessante zaak. In de afgelopen jaren is vooral op gemeentelijk niveau drastisch gesneden in de onderhoudsbudgetten. Deze bezuinigingen waren echter meer ingegeven door de stand van de gemeentefinanciën dan door een vermindering van de onderhoudsbehoefte van het wegennet.

Anders dan bijvoorbeeld bij vliegtuigen, leidt achterstallig onderhoud niet onmiddellijk tot het falen van de weg. Bovendien is de afkeur-norm niet eenduidig bepaald.

Daarom is onderhoud van gemeentewegen een speelbal van de politiek, waardoor het volgens plan uitvoeren van onderhoud buitengewoon moeilijk wordt.

Rijkswaterstaat houdt zich sinds tien jaar in het project 'rationeel wegbeheer' bezig met de analyse en de beheersing van het onderhoud. Gezien de lange ontwerplevensduur van het wegdek (20 jaar) zijn de resultaten van dit project nog niet in volle omvang zichtbaar.

Het relatieve belang van onderhoud ten opzichte van nieuwbouw is sterk toegenomen. Het wegennet is na de oorlog sterk gegroeid. Ondanks het nog steeds toenemende verkeersaanbod zullen nieuw aan te leggen wegen een gering percentage van het bestaande net vormen, terwijl het omvangrijke bestaande net moet worden onderhouden.

Het Nederlandse wegennet kan op een aantal manieren worden ingedeeld, bijvoorbeeld naar beheerder. Onderscheiden worden rijkswegen, provinciale wegen, gemeentelijke wegen en wegen, beheerd door waterschappen. Rijkswaterstaat beheert 4500 km weg en de provincies 5200 km (exclusief Zuidelijk Flevoland).

De Wet Uitkering Wegen onderscheidt primaire, secundaire, tertiaire, kwartaire en niet-planwegen. In 1983 bezat Nederland 95.271 km verharde weg, waarvan 53.983 buiten de bebouwde kom [74].

De gevolgschade van files wordt door Rijkswaterstaat geschat op 100 miljoen gulden (1984) [27]. Door de Stichting Weg op 700 miljoen (1984) [24].

## 2.2 Het ontwerpen

### Het degradatieproces

Drie factoren bepalen het vereiste draagvermogen van de verharding, te weten:

- de verkeersbelasting;
- de eigenschappen van de verhardingsmaterialen en de ondergrond;
- de beheersstrategie.

De verkeersbelasting wordt bepaald door het aantal en de zwaarte van de aslasten die in de ontwerpperiode van de weg gebruik maken. Uit onderzoek is gebleken dat de achteruitgang van het draagvermogen evenredig is met ongeveer de vierde macht van de zwaarte van de aslast.

De eigenschappen van de materialen die van invloed zijn op het draagvermogen van de constructie, zijn:

- de weerstand tegen vervorming, zowel elastische als plastische;
- de weerstand tegen vermoeiing;
- de weerstand tegen verbrijzeling.

Indirect zijn ook van belang de weerstand tegen klimatologische invloeden en de waterhuishouding en de weerstand tegen agressieve stoffen.

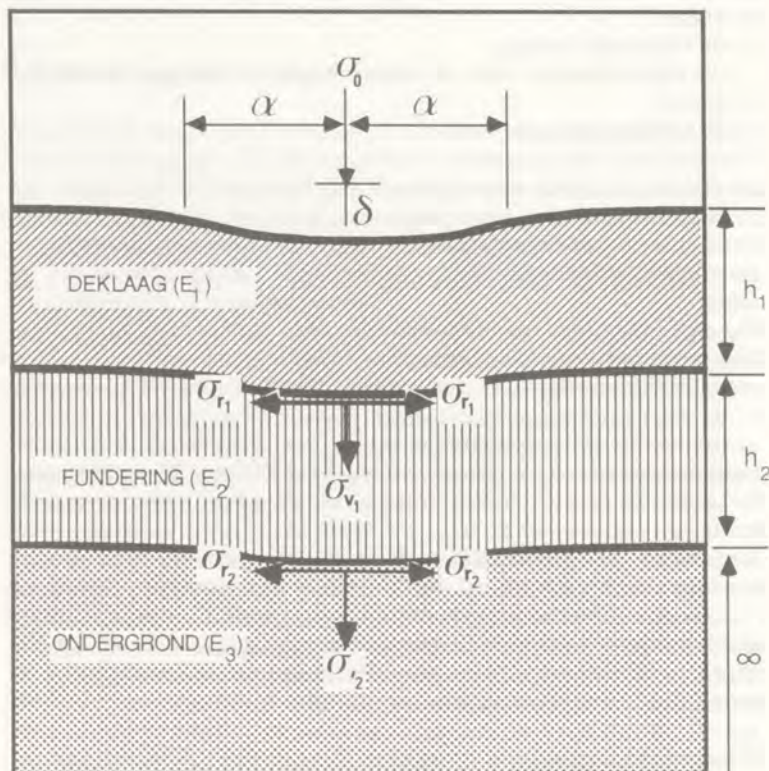
De beheersstrategie bepaalt welke ontwerplevensduur voor de verharding wordt gekozen en welke risico's van voortijdig bezwijken (functioneel of structureel) worden geaccepteerd. De beheersstrategie wordt beheerst door een economische afweging tussen de aanlegkosten (bepaald door de constructie-afmetingen en de kwaliteit van de materialen) en de kosten van onderhoud.

### Dimensionering

Onder dimensioneren wordt verstaan het kiezen van materialen, kwaliteiten en laagdikten zodat op geen enkel punt in de constructie de optredende spanningen en vervormingen zullen leiden tot het vroegtijdig, binnen de ontwerpperiode bezwijken van de constructie (falen volgens de onderhoudsnorm). Vaak zullen meer combinaties van laagdikten en materialen aan het doel kunnen beantwoorden. De beheersstrategie bepaalt dan de keuze.

De keuze van materialen en laagdikten is veelal gebaseerd op kennis en ervaring van de ontwerper. In de laatste decennia echter is het theoretisch inzicht in het gedrag van de verharding vergroot. Daardoor kan tegenwoordig bij het ontwerpen van verhardingsconstructies gebruik worden gemaakt van dimensioneringsmethoden die zijn

gebaseerd op het mechanisch gedrag van materialen onder invloed van daarop aangebrachte belastingen. De totale wegconstructie wordt daarbij geschematiseerd tot een lagensysteem (afb 2.1) waarbij de diverse lagen een bepaalde dikte en eigenschappen bezitten.



Afb. 2.1 Meerlagensysteem met maatgevende spanningen en vervormingen.

Bij deze schematisering wordt aangenomen dat de materialen de volgende eigenschappen bezitten:

- de materialen zijn lineair-elastisch;
- de constante van Poisson varieert niet;
- de materialen zijn homogeen en isotroop;
- de hechting tussen de lagen is volledig of nihil;
- de verkeersbelasting is verticaal gericht en gelijkmatig verdeeld over een cirkelvormig oppervlak; er treedt geen schuifspanning op aan het wegoppervlak.

De eigenschappen van de materialen worden uitgedrukt in de elasticiteitsmodulus en de constante van Poisson.

Met dit rekenmodel, dat zowel in de vorm van een computerprogramma als in de vorm van ontwerpgrafieken en tabellen beschikbaar is, worden in de constructie de in afbeelding 2.1 aangegeven spanningen en vervormingen en de uiteindelijk benodigde dikte berekend.

De belangrijkste ontwerpcriteria zijn de te verwachten

- horizontale rek aan de onderzijde van de asfaltlagen;
- horizontale (buig-trek) spanningen aan de onderzijde van cementgebonden materialen;
- verticale rek (stuik of zakking) aan de bovenzijde van de ondergrond;
- alzijdige spanning in ongebonden funderingsmaterialen.

De waarden hiervan worden berekend, uitgaande van een belasting die overeenkomt met de standaard aslast van 100 kiloNewton. De uitkomsten worden getoetst aan de toelaatbare waarden. Deze toelaatbare waarden zijn afhankelijk van de duur van en de toelaatbare schade tijdens de ontwerpperiode.

De betrouwbaarheid van de dimensionering is afhankelijk van:

- de vergaande schematisering van mechanisme en materiaalmodel;
- de schematisering van de in werkelijkheid geldende randvoorwaarden.

De schematisering die in het gebruikte model is toegepast, is tamelijk grof en niet geheel realistisch; de gekozen materialen en de ondergrond hebben andere eigenschappen dan in het model wordt aangenomen. Hierdoor zal ook het gedrag in de praktijk anders zijn dan op grond van het theoretisch model kan worden voorspeld. Verder is bekend dat in de praktijk de eigenschappen in sterke mate variëren, zowel in verticale richting (in de constructie) als in de lengterichting van de weg. Vele toegepaste materialen zijn natuurlijke of afvalprodukten. De eigenschappen daarvan vertonen een aanzienlijke spreiding. Tenslotte is ook het aanbrengen van de verharding geen industrieel gestuurd proces. Daardoor ontstaat nogmaals een variatie in eigenschappen van de aangebrachte materialen, zowel in verticale als in horizontale richting.

De schematisering van de randvoorwaarden wijkt vooral op de volgende punten af van de werkelijkheid:

- de hechting tussen de lagen varieert tussen volledig en vrijwel nihil;
- er treden niet alleen verticale, maar ook horizontale belastingen op;
- de maximale asfaltrek treedt niet alleen op aan de onderzijde van de asfaltlaag;

- er wordt verondersteld dat er geen trekspanningen optreden in de ongebonden materialen.

Het onderzoek zal zich de komende jaren richten op de ontwikkeling van betere rekenmodellen en stochastische ontwerpmethoden teneinde de genoemde tekortkomingen te verbeteren.

Momenteel beschikken de grondmechanica en enige andere bouwkundige disciplines reeds over geavanceerdere berekeningsmethoden, waarin realistischer materiaalmodellen (elasto-plastisch, elasto-viscoplastisch) en belastingen (wisselend, dynamisch) kunnen worden gehanteerd. Daarvoor zijn echter betere karakterisering van de materiaaleigenschappen nodig dan bij gebruik van simpele lineair-elastische programma's. Een en ander vergt een betere vastlegging van de werkelijke spanningstoestanden en dichtheden, alsmede meer gecompliceerde beproevingen in het laboratorium op representatieve monsters. De laatste jaren wordt behalve van genoemde berekeningsmethoden ook gebruik gemaakt van fysische modellen om het gedrag van wegconstructies te bestuderen. De geotechnische centrifuge is in dat verband een hulpmiddel bij uitstek. Teneinde de gelijkvormigheid tussen model en prototype te kunnen realiseren, dient bij geotechnische problemen het eigen gewicht van de lagen omgekeerd evenredig met de geometrische beproevingsschaal te worden opgevoerd; dit geschiedt met de opgewekte centripetale kracht. Op deze wijze geschiedt de beproeving dus op het spanningsniveau van het prototype. Momenteel is in Delft een van de grootste geotechnische centrifuges ter wereld in aanbouw.

### **Materiaaleigenschappen en gedrag van de verharding**

Bij asfalt- en cementgebonden materialen doen zich, evenals bij andere materialen, vermoeiingsverschijnselen voor; het aantal belastingherhalingen tot breuk is afhankelijk van de grootte van de optredende rek of spanning.

Overschrijding van dit rek- of spanningsniveau leidt tot scheurvorming in gebonden materialen en tot grote vervormingen in ongebonden materialen en in de ondergrond. In dat geval is het einde van de technische levensduur bereikt.

Dit moment of die eindsituatie is niet eenduidig gedefinieerd en bovendien feitelijk onjuist. Het einde van de levensduur wordt bepaald door het toelaatbare percentage van het wegoppervlak met scheurvorming. Indien dit bijvoorbeeld 5% is, wil dit zeggen dat de constructie met een betrouwbaarheid van 95% is ontworpen.

Het spreekt voor zich dat hogere betrouwbaarheid resulteert in een lager scheurvormingspercentage aan het einde van de levensduur of leidt tot eenzelfde scheurvorming na een langere levensduur.

Bovenstaande houdt in dat definiëring van de economische levensduur betekent een definiëring van de dan aanwezige schade.

In feite is een verharding echter nooit helemaal aan het einde van de levensduur. Op een verharding die voor 100% is gescheurd, kan nog wel worden gereden. Uit berekeningen is aangetoond dat in het algemeen van het einde van de levensduur wordt gesproken indien de equivalente laagdikte van de verharding is verminderd met 35 à 45% ten opzichte van de dikte bij aanleg. De equivalente laagdikte is de laagdikte gecorrigeerd met een factor waarin de verhouding tussen de elasticiteitsmodulus van de betreffende laag en die van de ondergrond is verwerkt. Hiermee wordt een vergelijking van het draagvermogen van materialen met een verschillende elasticiteitsmodulus mogelijk. Afname van de equivalente laagdikte wordt veroorzaakt door afname van de elasticiteitsmodulus als gevolg van scheurvorming of vervorming door vermoeiing. De snelheid waarmee dit plaatsvindt, is onder andere afhankelijk van het vermoeiingsgedrag van de materialen in de constructie. Door de variatie in deze eigenschappen in de lengterichting van de weg gezien en door de variatie in aangebrachte laagdikten ontstaan van plaats tot plaats verschillen in vermoeiingsgedrag en dus in optredende schade. Daardoor zal een verharding ook niet in één keer bezwijken, maar zal de schade eerst zeer plaatselijk zijn en zich van daaruit langzaam uitbreiden.

Uit onderzoek is gebleken dat verschillende samenstellingen van asfaltbeton een verschillend vermoeiingsgedrag vertonen. Van belang daarbij zijn de bereikte stijfheidsmodulus van het materiaal en het percentage bitumen. Voor de stijfheidsmodulus zijn weer van belang de volumeverhouding van mineraal en bitumen en de stijfheidsmodulus van het bitumen.

Voor het ontwerpcriterium vervorming is, behalve mengselsamenstelling en stijfheidsmodulus, ook de verdichting van het materiaal bij de aanleg van groot belang.

Behalve de vermoeiingseigenschappen van gebonden materialen, is ook de snelheid van scheurgroei naar het oppervlak van belang. De meeste toegepaste vermoeiingskarakteristieken geven de relatie tussen het aantal belastingherhalingen en het ontstaan van scheurvorming aan de onderzijde van een proefstuk. Eenvoudigheidshalve worden daarbij in het ontwerp factoren toegepast om de tijd te verdisconteren tussen het ontstaan van een scheur en het moment dat de scheur aan het oppervlak zichtbaar is.

Recent zijn methoden ontwikkeld om uit de mengseleigenschappen de scheurgroeisnelheid te kunnen berekenen. Hierbij is de belangrijkste parameter de holle ruimte in het materiaal. Een toename van de holle ruimte resulteert in een afname van de scheurgroeisnelheid.



### 2.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

In tegenstelling tot werktuigbouwkundige constructies worden bij een weg slechts een klein aantal componenten onderscheiden, namelijk de ondergrond, de aardenbaan, de fundering en de deklagen.

In het volgende wordt ingegaan op het gedrag van de aardenbaan en op het vermoeiingsgedrag van de deklaag. Dit gebeurt aan de hand van afb. 1.3. Er is niet gestreefd naar volledigheid. De genoemde zaken zijn voorbeelden.

#### De aardenbaan en de fundering

##### *A4 Verklein de spreiding in de belastbaarheid*

Molenaar wijst op de grote invloed van de stijfheid van de ondergrond op de technische levensduur [18]. Een verlaging van de CBR-waarde, een maat voor het draagvermogen, van 10% naar 2% vergt een verdubbeling van de verhardingsdikte; een vijfmaal zo hoge verkeersbelasting vergt een toename van de benodigde verhardingsdikte in de orde van slechts 25%.

Een belangrijk deel van het groot onderhoud aan wegen, vooral in westelijk en noordelijk Nederland, is dan ook een gevolg van de conditie waarin de ondergrond en de fundering van de wegconstructie verkeren.

Alhoewel daar nooit gericht onderzoek naar is gedaan, is elke grondmechanicus en wegenbouwer ervan overtuigd dat de lage waarden, maar vooral ook de lokale verschillen in de mechanische eigenschappen van ondergrond en funderingsmateriaal oorzaak zijn van talrijke zich aan het wegoppervlak manifesterende gebreken: onvlakheid in langs- of dwarsrichting, kuilen, rand-instabiliteiten enz. Deze lage waarden zijn globaal toe te schrijven aan twee oorzaken:

- onnauwkeurigheden bij de aanleg van de weg;
- lange-duur gedrag van de weg onder invloed van eigen gewicht van de wegconstructie en verkeersbelastingen.

Onnauwkeurigheden bij de aanleg van de weg zijn het gevolg van:

- Een te grofmazige verkenning van de ondergrond. Vooral doordat boringen en sonderingen slechts puntinformatie opleveren, worden discontinuïteiten in de weg vaak niet onderkend.
- Primitieve aanpak bij ontwerp en dimensionering. Ontwerp en uitvoeringsfilosofie zijn sterk traditioneel, met de nadruk op verhardingslagen. Ondergrond en fundering krijgen relatief weinig aandacht. De statische berekeningsmethoden zijn primitief en gaan uit van grove schematiseringen en gemiddelde waarden (zonder spreiding) voor parameters die het mechanisch gedrag karakteriseren.

- Gebrek aan tijd, ruimte en geld onder invloed van de politiek.
- Verouderde regelgeving met betrekking tot opleveringscontrole en controlemethoden; controle van andere eigenschappen dan die welke voor mechanisch en geohydrologisch gedrag verantwoordelijk zijn; toepassing van minimumwaarden als goedkeuringsnorm.

Het lange-duur gedrag van de wegconstructie is betrekkelijk onbekend omdat daarnaar nauwelijks onderzoek is gedaan. Door lokale relaxatie van vooral het zandbed of de ophoging kunnen op den duur discontinuïteiten in stijfheid en sterkte ontstaan.

Verbetering van deze situatie kan worden bereikt door:

- Toepassing van geofysische meetmethoden bij de verkenning van de ondergrond; daarmee is een continu beeld van de opbouw en de mechanische eigenschappen te verkrijgen. Voor een beter kwantitatief inzicht in de mechanische eigenschappen zal verdere ontwikkeling van geofysische methoden nodig zijn.
- Betere bekendheid met de mogelijkheden en onmogelijkheden van de traditionele en nieuwe wegenbouwmaterialen in ontwerp en uitvoering.
- Toepassing van modernere, beter met de werkelijkheid overeenkomende berekeningsmethoden, waarbij realistische sterkteparameters worden gehanteerd en gebruik wordt gemaakt van statistische waarden (het zogenaamde Bison/Bisar-programma; dit is niet nieuw, maar wordt nog weinig toegepast).
- Toepassing van relevante controlemethoden ter bepaling van de mechanische eigenschappen; momenteel zijn bij diverse machinebouwers ontwikkelingen gaande om de dynamische respons van de aardenbaan en de fundering tijdens de machine-overgang continu te meten en automatisch te registreren.
- Gebruik van relevante normen voor mechanische of geohydrologische kwaliteit bij de toetsing van de uitkomsten van de controlemetingen.
- Onderzoek naar het lange-duur gedrag van aardenbaan en weg-funderingen (diverse materialen).

### De verharding

Het doel van een verharding is de door het verkeer veroorzaakte belastingen zodanig over de ondergrond te spreiden dat daarin geen ontoelaatbare vervormingen ontstaan. Dit is de structurele eis ofwel het toelaatbare vervormingsdraagvermogen dat de verharding moet bezitten. Daarnaast zijn er nog een aantal functionele eisen waaraan het verhardingsoppervlak moet voldoen, onder andere die van vlakheid en stroefheid. In bepaalde situaties worden ook eisen gesteld aan de lichtreflectie en de geluidsproductie. In deze paragraaf zal

vooral worden ingegaan op mogelijkheden de verkeersbelasting te beheersen en te reduceren en op de structurele aspecten (beperkt tot de statische en thermische belasting) van de wegverharding.

#### *A1 Verlaag de belasting*

De factoren die de belasting van het wegstelsel bepalen, zijn beïnvloedbaar door de overheid. Nieuwe technieken kunnen bijdragen tot vermindering van de belasting (bijv. door een kaartleessysteem in de auto aan te brengen waardoor het omrijden en verkeerd rijden wordt verminderd).

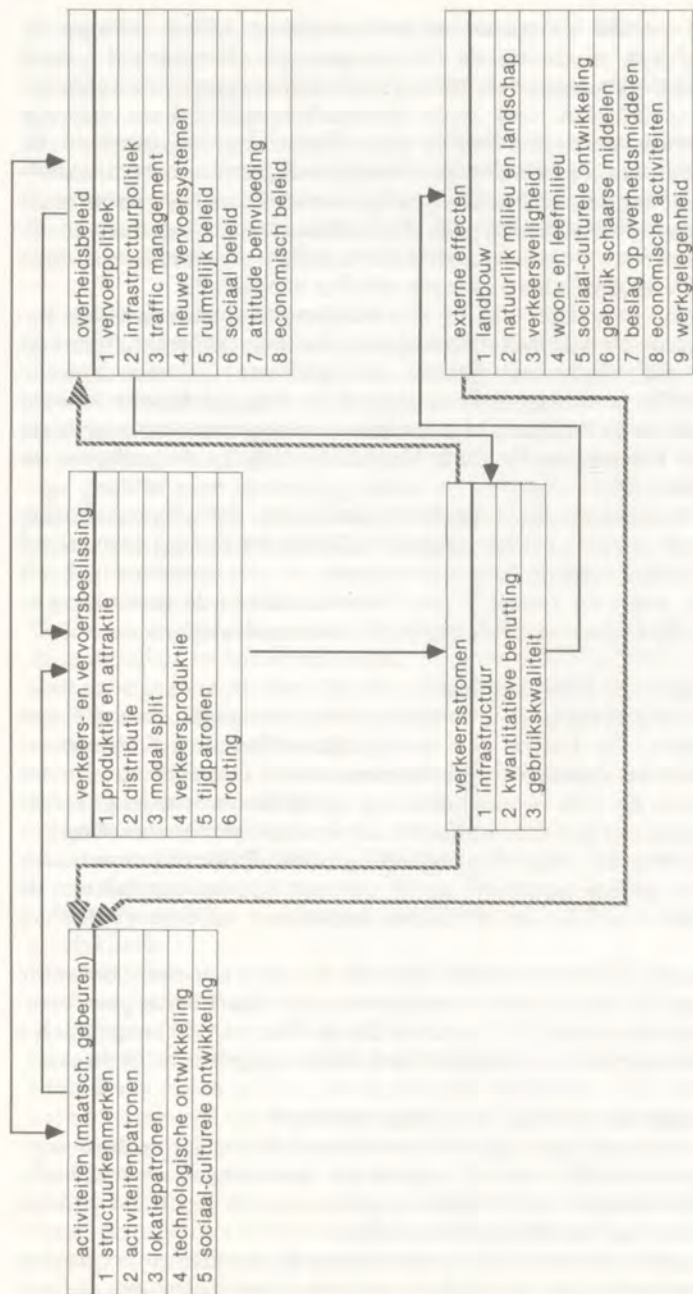
Het wegstelsel is bedoeld om de verplaatsing van personen en goederen mogelijk te maken. Als we praten over onderhoud en de kosten daarvan doen we dit in relatie tot een optimale functievervulling. De gebruiker hecht belang aan drie factoren:

- kwaliteit van de functievervulling, waaronder eigenschappen als veiligheid, rijcomfort en verkeersafwikkeling;
- beschikbaarheid, dat wil zeggen dat er geen files zijn en de weg niet is afgesloten wegens onderhoud;
- zo laag mogelijke gebruikskosten, dat wil zeggen dat de jaarkosten van aanleg en onderhoud samen minimaal moeten zijn.

Een schematische voorstelling van het verkeer- en vervoersysteem is weergegeven in afbeelding 2.2.

Als gevolg van economische activiteiten en activiteiten in de privé-sfeer (maatschappelijk gebeuren) worden verkeers- en vervoersbeslissingen genomen die leiden tot een verplaatsing. De som van deze verplaatsingen is het patroon van verkeersstromen via het wegennet. Zowel op de economische als privé-activiteiten als ook op de verplaatsingsbeslissing oefent de overheid invloed uit. De overheid verschaft de middelen voor het vervoer: het wegennet. Ten gevolge van de verkeersstromen treden externe effecten op, gunstige en ongunstige, die op hun beurt het gedrag van burger en overheid beïnvloeden. De burger oefent tenslotte invloed uit op het overheidsbeleid.

Omdat de achteruitgang in draagvermogen van de verharding evenredig is met de vierde macht van de aslast, kan enigszins overdreven worden gesteld dat de onderhoudsbehoefte van de verharding voornamelijk wordt veroorzaakt door het vrachtverkeer. Het personenverkeer rijdt gratis mee. Deze belasting kan de overheid tot op zekere hoogte beïnvloeden, bijvoorbeeld door vrachtvervoer per trein aantrekkelijker te maken of door de maximum toegestane aslast te vergroten. Het personenverkeer echter veroorzaakt de ochtend- en avondspits. Op die tijdstippen kan er niet worden gewerkt aan het snelwegennet. Dit verkleint de periode die beschikbaar is voor onderhoud, hetgeen sterk kostenverhogend werkt.



Afb. 2.2 Indeling van het verkeers- en vervoersonderzoek.

Zo zien we dat als we de onderhoudskosten willen verlagen de overheid kan sturen op de tijdpatronen uit afbeelding 2.2 door variabele werktijden te bevorderen of dalurenkorting bij de Spoorwegen te subsidiëren. Ook door thuiswerken met behulp van een telecommunicatieverbinding te bevorderen, kan de overheid de grootte van de spits beïnvloeden. Overigens blijkt uit een studie van de Stichting Weg dat slechts 30% van het aantal files wordt veroorzaakt door wegwerkzaamheden [24]. Een verouderend wegennet en de toenemende economische activiteiten zullen dit percentage doen stijgen als er geen nieuwe wegen worden aangelegd.

Een andere parameter waarop kan worden gestuurd is de routing. Daarmee wordt het bestaande wegennet optimaal gebruikt. Betere en snellere informatie met behulp van moderne systemen aan de automobilist over wegwerkzaamheden en files zal hiertoe kunnen bijdragen. In dit verband kan worden verwezen naar de preadviezen van het Wegencongres 1985: Automatisering in wegenbouw en wegverkeer [28].

Uit het voorgaande blijkt dat beïnvloeding van de verkeersbelasting een uiterst complex keuzevraagstuk is. Gezien het feit dat de overheid de activiteiten rond de nationale verkeers- en vervoersrekening heeft stilgezet, wenst zij kennelijk geen beter inzicht in de samenhang te krijgen. Zij beperkt zich tot optimalisatie van deelsystemen.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

De ontwerplevensduur van cementbeton is langer dan die van asfaltbeton. De kosten van aanleg zijn echter hoger. Molenaar benadrukt dat met een kleine toename van de laagdikte zowel voor asfaltbeton als voor cementbeton een sterke toename van het aantal toelaatbare aslasten is te realiseren. De kosten-baten verhouding van een iets zwaarder wegdek is duidelijk positief. Zo laat Molenaar zien dat in het gebied tussen  $10^5$  en  $10^7$  aslasten bij een toename van de asfaltdikte van 0,5-1 cm het aantal toelaatbare aslasten verdubbelt [18].

Onderzoek bij Rijkswaterstaat lijkt erop te wijzen dat onder bepaalde voorwaarden een langere ontwerplevensduur dan twintig jaar financieel aantrekkelijk is. Dit betekent dat de dikte van de aangebrachte verharding groter zou moeten worden dan nu gebruikelijk is.

#### *A4 Verklein de spreiding in de belastbaarheid*

Gezien de grote gevoeligheid van de technische levensduur voor variaties in de dikte van het wegdek zal een intensievere kwaliteitscontrole, eventueel met behulp van geavanceerde registratie-apparatuur, leiden tot een langere levensduur.

Uit systematisch verzamelde gegevens van de conditie van wegen kan meer inzicht worden verkregen in de invloed van materialen, verhar-

dingsconstructies, draagkracht van de ondergrond, klimaat en aslasten op het lange-duur gedrag van het wegdek en de daarop aangebrachte overlagingen. Dit kan leiden tot aanpassing van de nu gehanteerde ontwerpmethoden.

Het vorenstaande geldt voor wegen waarvoor een langere levensduur vereist is, zoals die buiten de bebouwde kom. Wegen in de bebouwde kom moeten zo vaak worden opgebroken dat het accent noodgedwongen moet liggen op het snel kunnen verwijderen en weer aanbrengen van de verharding.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Zettingen van de aardenbaan probeert men zoveel mogelijk te vermijden door het zandbed voldoende lang tevoren aan te brengen of door tevoren zettingsgevoelige lagen te vervangen door ander materiaal (grondverbetering). Een andere mogelijkheid is het toepassen van lichte materialen (bijvoorbeeld polystyreen blokken) die door hun lage gewicht geen aanleiding geven tot zettingen in de ondergrond. Met het oog op het zware verkeer mag de wegconstructie overigens niet een te geringe massatraagheid krijgen.

#### *B2 Maak een degradatiekromme*

Tijdens en na de aanleg van verhardingen vinden controles plaats van de materialen en het eindprodukt. Deze kwaliteitscontrole heeft het doel na te gaan of de eisen die de opdrachtgever aan het eindprodukt heeft gesteld, zijn gehaald. Deze eisen betreffen:

- Marshall waarden (van asfalt)
- druksterkte (voor cementgebonden materialen)
- mengselsamenstelling
- holle ruimte (asfalt)
- bitumengehalte (asfalt)
- verdichtingsgraad
- korrelverdeling
- vlakheid
- stroefheid
- dikte van de laag.

Deze eisen worden opgesteld op grond van de ontwerpspecificaties. Hierbij wordt een zekere standaardisatie toegepast. Niet voor ieder werk afzonderlijk worden eisen opgesteld. Zoals uit bovengenoemde opsomming blijkt, is de kwaliteitscontrole grotendeels gericht op de kwaliteit van de geleverde materialen. Deze kwaliteit wordt getoetst aan de hand van de in het laboratorium vervaardigde monsters.

Vergelijking van de meetresultaten met de criteria op basis waarvan de constructie is gedimensioneerd, laat zien dat de uitgevoerde controle onvolledig en indirect en daarom voor verbetering vatbaar is. Vooral

ontbreekt een controle op de breuk- en scheurgroeieigenschappen van asfaltbeton in de uitgevoerde constructie. Bij het ontwerp wordt ervan uitgegaan dat de samenstelling van het aangebrachte materiaal zodanig is dat aan deze eigenschappen wordt voldaan. Daartoe wordt een aantal parameters afzonderlijk gecontroleerd. Het totale produkt met al zijn variaties van de diverse eigenschappen wordt niet op een statistisch verantwoorde wijze gecontroleerd.

Het ontstaan van schade is afhankelijk van de dikten van alle lagen, de samenstelling van funderingsmaterialen, de verdichtingsgraad van alle materialen en de draagkracht van de ondergrond. Ook deze parameters worden wel afzonderlijk gecontroleerd, maar er vindt geen controle plaats van het totale eindprodukt, namelijk de draagkracht van de constructie. Dit betekent dat het nulpunt van de degradatiekromme niet goed vastligt.

Gezien deze discrepantie verdient het aanbeveling de controle uit te breiden en gedeeltelijk te vervangen door controles op parameters die meer informatie verschaffen over de kwaliteit en daarmee over de levensduur van het eindprodukt. Uitvoering van slijtproeven op boorkernen en deflectiemetingen (meting van de draagkracht) geven de genoemde informatie.

Slijtproeven leveren informatie omtrent het vermoeiingsgedrag. Met deflectiemetingen kan worden berekend welke spanningen en vervormingen optreden onder de standaard aslast. Deze waarden kunnen worden getoetst aan het ontwerp. Deze metingen kunnen statistisch verantwoord worden uitgevoerd, waardoor uitspraken kunnen worden gedaan omtrent de betrouwbaarheid van de aangenomen levensduur van de constructie. Uit deze metingen kunnen verbeterde specificaties voor ontwerp en uitvoering worden afgeleid.

Door de verkeersbelastingen en het klimaat zal de kwaliteit van een verharding achteruitgaan. Deze achteruitgang is gedeeltelijk zichtbaar en gedeeltelijk meetbaar. De diagnose zal dan ook bestaan uit een periodieke visuele inspectie van de verharding, aangevuld met metingen. Ten aanzien van de vlakheid, stroefheid, en oppervlaktestructuur zijn normen opgesteld. Toetsing van meet- en inspectieresultaten hieraan kan leiden tot de uitvoering van onderhoud. Indien dat tijdig wordt gedaan is er geen gevaar voor de verkeersveiligheid en blijft het rijcomfort acceptabel.

De diagnose van de structurele conditie is moeilijker. Een slechte conditie komt tot uiting in scheurvorming, die bij visuele inspectie wordt waargenomen. Deze scheurvorming hoeft echter niet altijd te duiden op structurele achteruitgang. Bovendien is scheurvorming niet altijd aan het wegooppervlak waar te nemen. Daarom zijn naast visuele inspecties in sommige gevallen metingen nodig om de structurele

achteruitgang vast te stellen. Deze metingen worden echter vanwege de relatief hoge kosten slechts selectief uitgevoerd. Het tijdig en op de juiste wijze aangeven van een structurele achteruitgang is van groot bedrijfseconomisch belang. Het niet tijdig uitvoeren van maatregelen ter versterking van de constructie kan ertoe leiden dat de kosten in een later stadium aanmerkelijk hoger zijn. Daarom en omdat de achteruitgang in de lengterichting van de weg grote variaties kan vertonen, is er behoefte aan een eenvoudige en snelle detectiemethode. Wellicht dat akoestische (ultrasone) inspectie hiervoor in de toekomst een oplossing biedt. Door allerlei verbeteringen van deze techniek is het ook mogelijk in moeilijke materialen, zoals asfaltbeton, scheuren te detecteren. Ook laser- en elektromagnetische meetmethoden lijken veelbelovend.

#### *C3 Verklein de reparatietijd*

De keuze van het juiste reparatiemateriaal is moeilijk. Enerzijds moeten de eigenschappen van het gekozen materiaal goed aansluiten bij de bestaande constructie. Anderzijds kan worden gekozen uit een veelheid aan materialen. Expertsystemen kunnen de tijd voor het maken van een juiste keuze bekorten.

#### *D3 Verklein de reparatietijd*

Naar gelang de effecten van filevorming ernstiger worden genomen, neemt de aantrekkelijkheid van cementbeton met zijn langere levensduur toe. Toepassing van radar- en lasertechniek maakt het mogelijk inspecties op scheurvorming uit te voeren zonder de betreffende rijbaan af te zetten, waardoor de tijd dat een rijbaan wegens onderhoud buiten gebruik is, wordt bekort.

#### *D4 Vergroot de voorspelbaarheid van de noodzaak tot onderhoud*

Door een snellere informatievoorziening aan weggebruikers over files en wegwerkzaamheden kunnen vertragingen en dus kosten voor de weggebruiker verder worden verminderd.

#### *D5 Pas compartimentering toe*

Door het toepassen van kunststof matten (geotextiel) kan afglijden van het wegdek worden tegengegaan.

## **2.4 Gevolgen voor aard en omvang van het onderhoud**

Verlaging van de belasting en vergroting van de belastbaarheid betekenen een verlaging van de onderhoudskosten.

Verkleining van de spreiding in de belastbaarheid heeft tot gevolg dat schade meer op een moment geconcentreerd zal optreden. Meer



inspectie zal dan nodig zijn om op tijd onderhoud te plegen. Het beter voorspelbaar maken van het einde van de levensduur maakt het mogelijk het onderhoud beter te plannen en maakt meer geëigende onderhoudsmaatregelen mogelijk.

Het is niet bekend wat de in 2.3 genoemde zaken aan besparingen opleveren.

Door de geringe reproduceerbaarheid van wegontwerpen, wat het leren uit ervaring bemoeilijkt, is de aandacht in Nederland meer gericht op toestandsafhankelijk onderhoud (in de wegenbouw 'rationeel wegbeheer' genoemd) en verfijndere onderhoudsmethoden dan op onderhoudsbewust ontwerpen. In de Verenigde Staten is een omvangrijk onderzoek begonnen dat meer inzicht moet bieden in de invloed van diverse variabelen op de economische levensduur van verhardingen. Men poogt op die wijze een betere greep te krijgen op het onderhoudsbewust ontwerpen [20].

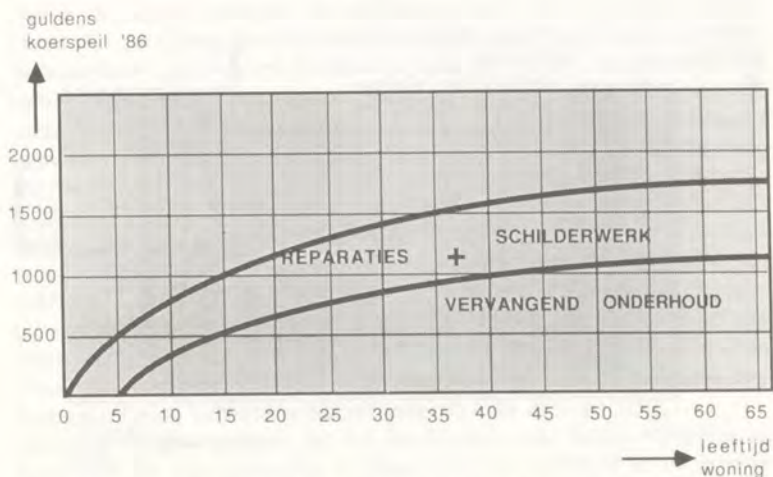
## 3. Bouw

### 3.1 Inleiding

Als Nederland zijn huidige voorraad gebouwen op identieke wijze zou herbouwen, zou daarvoor ongeveer 1.000 miljard gulden nodig zijn. De bouwvoorraad vormt de helft van onze kapitaalgoederenvoorraad (dit is het bezit van Nederland). Goed onderhoud is dus van groot economisch belang.

Het onderhoud van gebouwen is nauwelijks vergelijkbaar met het onderhoud van andere goederen. Bij gebouwen ligt het accent op de instandhouding, terwijl bij transportmiddelen de veiligheid centraal staat en bij de meeste machines de bedrijfszekerheid. Dit komt vooral omdat gebouwen bedoeld zijn lang mee te gaan en in de praktijk doen ze dat ook. De gemiddelde werkelijk bereikte levensduur van een Nederlandse woning is circa 90 jaar.

De ouderdom komt met gebreken; in dit opzicht onderscheiden gebouwen zich niet van mensen. Dit betekent dat hoe ouder een gebouw is des te meer onderhoud er is vereist. In afbeelding 3.1 is dit verband schematisch weergegeven.

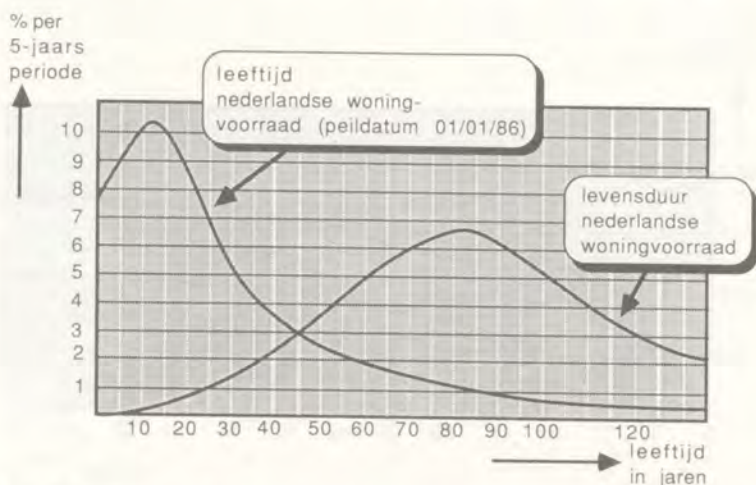


Afb. 3.1 Jaarlijks benodigde onderhoudskosten per woning gedurende de levensduur, prijspeil 1986 excl. BTW.

Het onderhoud is gesplitst in vervangend onderhoud en reparaties plus schilderwerk. Vervangend onderhoud is het geheel of gedeeltelijk vernieuwen van bouwdeelen, zoals daken, kozijnen, vloeren en plafonds.

De Nederlandse gebouwenvoorraad is relatief erg jong. Bijna driekwart ervan is na 1945 gebouwd. Dit is aan een kant gelukkig, want het betekent dat de gebouwenvoorraad in het algemeen een goede kwaliteit heeft en dat de onderhoudsinspanning gezien de gemiddelde leeftijd betrekkelijk laag is. Aan de andere kant heeft deze scheve leeftijdsopbouw tot gevolg dat de inspanning om de kwaliteit te handhaven steeds groter wordt en de relatief geringe onderhoudsbehoefte nu over enige tijd omslaat in een relatief grote onderhoudsinspanning. Dit is schematisch weergegeven in afbeelding 3.2. Daarbij kan men zich de levensduurkromme gefixeerd voorstellen, terwijl de leeftijdsopbouw ieder jaar een stukje naar rechts opschuift.

Hoewel de gebouwenvoorraad in het algemeen van goede kwaliteit is, is de omvang van het achterstallig onderhoud aanzienlijk. In tabel 3.1 is voor een gemiddelde woning weergegeven hoe de achterstand is verdeeld over de bouwdeelen; hetzelfde is gedaan voor de benodigde onderhoudskosten. De gemiddelde achterstand in onderhoud is bijna f 8.000,- per woning. Ook in de sector overige gebouwen is de achterstand aanzienlijk. Ondanks de relatief geringe onderhoudsbehoefte is de verrichte onderhoudsinspanning in het verleden structureel te laag geweest. Dit belooft dus niet veel goeds voor de toekomst,



Afb. 3.2 Leeftijdsopbouw en levensduurverwachting van de Nederlandse woningvoorraad.

tenzij het onderhoud van onze gebouwen van nu af aan meer aandacht gaat krijgen.

Tabel 3.1 Gemiddelde onderhoudsachterstand en gemiddelde jaarlijks benodigde onderhoudskosten per woning, prijspeil 1986 excl. BTW

Bouwdeel	Achterstand		Jaarlijkse onderhoudskosten**	
	f	%	f	%
Gevelconstructie	880	11	40	3
Gevelinvulling	2080	27	280	20
Schilderwerk	1360	17	230	17
Daken	1520	19	270	19
Vloer/Plafond	720	9	90	6
Wanden	960	12	110	8
Installaties*/ Uitrusting	400	5	380	27
<b>TOTAAL</b>	<b>7920</b>	<b>100</b>	<b>1400</b>	<b>100</b>

\* exclusief c.v.- en liftinstallatie

\*\* gebaseerd op een analytische bepaling van de onderhoudsbehoefte van een representatieve woning, gemiddeld over de eerste zeventig leeftijdjaren

Een ander aspect is het onderhoud veroorzaakt door bouwfouten. Dit komt niet tot uiting in de genoemde cijfers, maar is van groot belang. Betrouwbare cijfers over de omvang van het herstel ten gevolge van bouwfouten ontbreken, maar sommigen schatten dat 40% van het uitgevoerde onderhoud vermijdbaar zou zijn als er geen bouwfouten zouden zijn gemaakt. Een van de redenen voor het optreden van zoveel bouwfouten is ongetwijfeld dat er constant prototypen worden gebouwd, zonder een ontwikkelingstraject en zonder testperiode. Dit onderscheidt de bouw van andere bedrijfstakken. Iets overdreven kan worden gesteld dat de vijf miljoen auto's in Nederland bestaan uit tien merken, vijf modellen per merk en drie typen per model. Jaar in jaar uit rollen dezelfde of bijna dezelfde auto's de fabriek uit. Als er een nieuw model op de markt komt, is er meer dan vijf jaar aan gewerkt en mee geëxperimenteerd. De investering tot op dat moment is meer dan twintigduizend keer de catalogusprijs van de nieuwe auto. Hiermee wil niet gezegd zijn dat de situatie in de bouw achterlijk is, zelfs niet dat hij ongewenst is, maar wel dat de bouw in de meeste opzichten niet met andere bedrijfstakken is te vergelijken en specifieke oplossingen vraagt voor zijn specifieke problemen.

### 3.2 Onderhoud

Bouwkundig onderhoud in de toekomst heeft vooral betrekking op gebouwen die er nu al staan. De bijdrage van de nieuwbouw is gering. Allerwege (volkshuisvesting, scholenbouw, kantorenbeheer) wordt dan ook gesproken over de noodzaak tot ontwikkeling van een voorraadbeleid.

Het voorwoord van het Volkshuisvestingsplan 1986-1990 van de gemeente Rotterdam zegt het als volgt: '... het voorraadbeleid (vormt) het hoofdthema van dit volkshuisvestingsplan. Stadsbeheer, wijkbeheer, woningbeheer, beheer na stadsvernieuwing, het zijn nieuwe begrippen die zijn opgedoken in volkshuisvestingsland. Het is de omvangrijke stadsvernieuwingsoperatie, gevolg van slechte bouw en jarenlange verwaarlozing - gebrek aan goed onderhoud en beheer - die de ogen deed openen voor de noodzaak om de kwaliteit van de woningvoorraad op peil te houden. Goede onderhoudsplanning en -technieken, een efficiënt financieel-administratief controle-apparaat, gecoördineerd onderhoud en verbetering van woningen en woonomgeving moeten als vanzelfsprekend tot het volkshuisvestingsbeleid gaan behoren.' [35].

Het blijkt dat innovaties op onderhoudsgebied vooral moeten zijn gericht op de bestaande voorraad. Verder is duidelijk dat, behalve door technische vernieuwingen, verbeteringen moeten worden gerealiseerd in beheer en organisatie van het onderhoud.

De belangrijkste bijdrage tot een betere beheersing van het onderhoud is gelegen in rationalisering van het werk door middel van planmatig en toestandsafhankelijk onderhoud. Hiermee wordt het mogelijk de financiële en technische problemen het hoofd te bieden.

Ten behoeve van het ontwerpen kunnen nog de volgende opmerkingen worden geplaatst:

- De bouw heeft een sterk versnipperde voortbrengingsstructuur. Daardoor wordt kennis van onderhoud onvoldoende teruggekoppeld naar de ontwerper. Onder andere daarom zijn vroeger vaak nieuwe bouwmaterialen toegepast die onvoldoende waren beproefd in praktijksituaties en die al na korte tijd problemen bleken te veroorzaken. De centrale overheid zou door oprichting van een gegevensbank over het lange-duurgedrag van bouwmaterialen herhaling van bouwfouten kunnen helpen voorkomen.
- De huidige financieringsstructuur in de sociale woningbouw, waarbij de aandacht voornamelijk gericht is op zo laag mogelijke stichtingskosten, staat een evenwichtige verdeling van de kosten over de levensduur in de weg.
- De renovatie-inspanning voor draagconstructie en buitenschil (de

primaire delen) moet vooral zijn gericht op verlenging van levensduur, verbetering van kwaliteit en minimalisering van onderhoud.

- Fundamentele bouwfysische kennis, bijvoorbeeld omtrent de vochtuishouding, zou in beter toepasbare vorm beschikbaar moeten komen. Een integrale beschouwing van het ventilatie- en verwarmingssysteem is daarbij van belang.
- De ontwerper dient te streven naar een eenvoudige uitvoering, een goed contact met de opdrachtgever en een tevreden gebruiker.

In het volgende wordt per bouwdeel aangegeven welke technische ontwikkelingen in het onderhoud zijn te verwachten. Alleen de buitenschil van woningen wordt bekeken (de primaire delen in de terminologie van Vroman [31]). Inpandige elementen worden buiten beschouwing gelaten omdat hierbij talloze andere criteria (esthetica, functionaliteit, representativiteit, reinigbaarheid) een rol spelen.

De volgende bouwdeelen worden onderscheiden [13]: fundering en vloer begane grond, draagconstructie, dakconstructie, gevel, ramen en kozijnen, dakbedekking en goten en hemelwaterafvoer. Aan de hand van afbeelding 1.3 wordt gezien welke verbeteringen er op onderhoudsgebied zijn te realiseren.

### 3.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

Grote produktinnovaties zijn er niet te verwachten, enerzijds omdat er geen grote technische veranderingen zijn te verwachten, anderzijds omdat het onderhoud zich vrijwel geheel zal afspelen in de nu bestaande gebouwenvoorraad, waardoor de vrijheid van handelen beperkt is.

Wel worden er veel kleine produktverbeteringen verwacht. Uit de mogelijkheden zal onderhoudsbewuster worden gekozen en kennis en ervaring zullen gericht worden toegepast. Deze veranderingen zullen worden bevorderd door een grotere aandacht voor de kosten van onderhoud en een rationelere, beter geplande organisatie van werkvoorbereiding en uitvoering.

#### De draagconstructie

##### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Balkon- en galerijvloeren worden steeds meer voorzien van een traditionele cementdekvloer. Daarnaast worden ook waterdichte bekleding (zoals etheenpropeendimonomeer (EPDM)-folie) en dakbedekkingmaterialen (atactisch polypropyleen (APP) en stireenbu-

tadienstireen (SBS)) toegepast. Verfachtige produkten als lakken, troffellagen en gietmortels zijn geen grote toekomst beschoren, vanwege de hoge prijs en problemen met hechting, elasticiteit en waterdichtheid.

Op thermisch verzinkt staal bijvoorbeeld van balkon- en galerijhekken zijn chloorrubber/vinylverven en voor bepaalde toepassingen epoxy- en polyurethaanverven goede keuzen. De verf is nodig om aantasting van de zinklaag door de atmosfeer tegen te gaan. Met deze verfsoorten ontstaan geen problemen met de hechting op het zink of vanwege aantasting van de zinklaag door de verf.

### **De dakconstructie**

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Er mag geen open verbinding bestaan tussen spouw en dakconstructie, omdat anders door intrekking vocht houtrot kan optreden. Bij de afwerking van het dak zullen multiplex boeiboorden worden vervangen door volkern-panelen, geëmailleerde platen en pre-paint gecoat aluminium.

### **De gevel**

De relatie tussen thermische isolatie en de vochthuishouding in de woning zal meer aandacht krijgen.

#### *A1 Verlaag de belasting*

Door betonnen galerijvloeren op afschot te leggen, wordt een te grote vochtbelasting voorkomen.

Bij het ontwerpen moet het verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen beton en andere materialen worden opgevangen door toepassing van een schuifconstructie of kitvoegen.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Door poreuze steensoorten te impregneren met een waterafstotend middel wordt binnendringen van vocht voorkomen, maar ook aantasting van de steen zelf ten gevolge van mosgroei en vorstschade.

Op beton is steeds meer toepassing te verwachten van dampdoorlaatbare systemen (vooral silicaat-acrylaatverf en siloxaanverf), ook op constructies die tot nu toe onbehandeld waren.

Door duurzame kitten te gebruiken, zoals twee-componenten polysulfide en polyurethaan, kunnen de onderhoudskosten worden verminderd. Ook zal worden gezocht naar kitvervangende oplossingen, zoals overbruggende klemstrips van aluminium.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Om te voorkomen dat de muur doorslaat (regenwater het binnenspouwblad bereikt) is het nodig een luchtspouw toe te passen, ook in combinatie met spouwmuurisolatie. Om dezelfde reden dient de spouw goed geventileerd te zijn door het consequent toepassen van open stootvoegen.

Om te voorkomen dat vocht in de spouw condenseert en dus slecht is af te voeren met behulp van ventilatie past men folie-afdichtingen achter de buitenmuur toe; daardoor stijgt de temperatuur in de spouw.

Bij het ontwerpen dienen zogenaamde koudebruggen (punten van direct contact tussen buitenmuur en inpandige delen) te worden vermeden. Anders treedt inpandig condensvorming en daarmee aantasting van materialen op.

Toepassing van buitenisolatie, aantrekkelijk omdat zowel buitenspouwblad als spouw in de winter een hogere temperatuur hebben, zal waarschijnlijk geen grote vlucht nemen. Op dit moment is de prijs van de sierpleisterafwerking hiervoor een belemmering, evenals de gevoeligheid voor mechanische beschadiging.

### **Ramen en kozijnen**

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Bij de keuze van het materiaal voor kozijnen is op dit moment geen duidelijke voorkeur voor hout, kunststof of aluminium aan te geven. Weliswaar worden met kunststof houtrot en noodzaak tot schilderen vermeden, maar daar komen andere onderhoudsbehandelingen en faaloorzaken voor in de plaats.

Kunststof en aluminium vergen bovendien een grotere investering. Daarom wordt verwacht dat kozijnen voorlopig nog veelal in hout zullen worden uitgevoerd, met een toenemend gebruik van hardhout. De toepassing van kunststof kozijnen groeit, met daarnaast een beperkte, maar belangrijke toepassing van kwalitatief hoogstaande meerkamer aluminium kozijnen met duurzame oppervlaktebehandeling.

Voor gevel- en kozijnvullingen wordt minder gebruik gemaakt van asbest en multiplex; alternatieven zijn volkern-panelen, geëmailleerde of geplastificeerde metaalplaat en gewolmanniseerde (op een bepaalde wijze geïmpregneerde) houten delen.

Voor het onderhoud zijn beschermingslagen van groot belang. Bij houtconstructies is er een tendens tot het in de fabriek aanbrengen van lak op een verduurzaamde ondergrond (VAC-VAC systeem) en een waterwerende primer. Voor bestaand werk blijven de hoogglans alkydverven en de dekkende kleurbeitsen op alkydbasis de geschikte materialen.



*C3 Verklein de reparatietijd*

In de bouw zijn grote besparingen te bereiken door standaardisatie en betere vervangbaarheid. Dit geldt in het algemeen voor alle delen die een kortere technische levensduur hebben dan de totale constructie.

**De dakbedekking***A2 Vergroot de belastbaarheid*

Voor hellende daken blijven de aangewezen bedekking. Keramische pannen zijn wegens hun lange technische levensduur nog steeds aantrekkelijk. Betonpannen met granulaatafwerking, goedkoper dan keramische pannen, zullen worden vervangen door pannen met een gladde acrylaat toplaag of door geglazuurde pannen. De ervaring heeft geleerd dat het granulaat van betonpannen op den duur los laat. Dan kan vocht binnendringen in de in het beton aanwezige haarscheurtjes en de pan degradeert vervolgens onder invloed van vorst. Bij acrylaat en glazuur blijft de beschermlaag intact.

Voor platte daken is met gemodificeerde bitumina, vooral APP en SBS, een verlenging van de technische levensduur mogelijk, niet alleen als toplaag, maar ook voor de onderliggende lagen. De markt voor vloeibare dakbedekking wordt, gezien de ervaringen tot nu toe, niet groot geacht.

**Goten en hemelwaterafvoer***A2 Vergroot de belastbaarheid*

Dakdoorvoeren en dakramen zullen meer in metaal worden uitgevoerd, gezien de snelle veroudering van kunststof.

---

## 4. Procesindustrie

### 4.1 Inleiding

De procesindustrie bestaat uit een verzameling bedrijven met zeer verschillende processen en produkten. Tot de procesindustrie behoren olieraffinaderijen, staalindustrie, voedingsmiddelenindustrie, chemische industrie en energievoorziening.

In deze bedrijven worden echter wel dezelfde soorten componenten gebruikt, zoals ketels, pompen en ventilatoren. Vanwege de verschillende procescondities kunnen de voornaamste storingsorzaken sterk uiteenlopen.

Bij het ontwerpen van procesinstallaties kan onderscheid worden gemaakt tussen het procesniveau, het systeemniveau en het componentniveau.

Soms kan het onderhoud aan een component aanzienlijk worden verminderd door de procescondities iets aan te passen. Ontbreekt deze mogelijkheid dan zal het ontwerp van de component moeten worden verbeterd.

Uit gegevens van een aantal grote industrieën kan worden afgeleid dat roterende machines zowel absoluut als relatief (ten opzichte van de vervangingswaarde) het meeste onderhoud vergen. Ketels en procesfornuizen zijn een goede tweede. De nu volgende beschouwing beperkt zich dan ook tot deze twee categorieën.

Tot de roterende machines worden gerekend: elektromotoren (draaistroom- en gelijkstroommotoren), pompen (plunjer-, zuiger-, centrifugaal- en schroefpompen), turbines (stoom- en gasturbines) en compressoren (zuiger-, axiaal/centrifugaal- en schroefcompressoren en ventilatoren).

Bij wijze van voorbeeld worden hier elektromotoren en pompen behandeld.

### 4.2 Elektromotoren

#### Onderhoud

Bij draaistroommotoren zijn de voornaamste storingsorzaken:

- defecte lagers: ten gevolge van onjuiste smering, stroomdoorgang,

- verkeerde speling, ongewenste krachten op de koppeling en stilstandsschade door trillingen;
- kort- en aardsluitingen in wikkelingen ten gevolge van veroudering;
- ventilatoren: ten gevolge van vervuiling en trillingen;
- motorhuizen: ten gevolge van statortrillingen (lichte constructie).

Bij gelijkstroommotoren zijn de voornaamste storingsorzaken:

- lagers; als bij draaistroommotoren;
- collectoren: ten gevolge van ongelijkmatige slijtage van het collectoroppervlak;
- aardsluiting; als bij draaistroommotoren.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

Aan de hand van afbeelding 1.3 wordt nagegaan welke mogelijkheden er zijn de onderhoudsbehoefte te optimaliseren. De gegeven voorbeelden zijn niet bedoeld volledig te zijn.

#### *A3 Verklein de spreiding in de belasting*

Door het toepassen van een elektronische regeling worden te hoge waarden van de motorstroom vermeden bij sprongvormige verandering van het belastingskoppel. Daarmee worden thermische overbelasting van het isolatiemateriaal en te grote krachten op de windingen tegengegaan.

Bij draaistroommotoren geeft bewaking van de temperatuur van de wikkeling met behulp van een microprocessor een veel betere beveiliging tegen overbelasting dan het traditionele thermische relais. Loopt een motor die bedoeld is voor stationair bedrijf om een of andere reden binnen korte tijd een aantal malen aan, dan biedt het thermisch relais geen adequate beveiliging omdat de temperatuur-tijdconstante van het relais veel kleiner is dan die van de motor. In de microprocessor kan echter steeds de actuele temperatuur van de wikkeling worden berekend met inachtnaam van de voorgeschiedenis.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Door in plaats van een gelijkstroommotor een draaistroommotor toe te passen, vervalt de collector: een onderdeel dat gevoelig is voor koppelstoten en veel onderhoud behoeft. Om een gelijkstroommotor zo goedkoop mogelijk te houden, moet deze direct worden gekoeld. Omdat de draaistroommotor relatief goedkoop is, kan deze geheel gesloten worden uitgevoerd met koeling via het motorhuis; daarmee worden vervuilingproblemen vermeden.

### *B3 Breng een sensor aan*

De voornaamste storingsoorzaak bij elektromotoren is slijtage van de lagers. Het in het ontwerp aanbrengen van een mogelijkheid eenvoudig en eenduidig een trillingssensor te monteren, kan bijdragen tot een beter inzicht in het verloop van lagerslijtage en een betere voorspelbaarheid van het tijdstip van defect raken.

### *C2 Verklein de diagnosetijd*

Toepassing van een microprocessor in het regelsysteem van de aandrijving kan de diagnosetijd verkleinen en de diagnosenaauwkeurigheid vergroten, dankzij een groot aantal signaleringen. Crashlog-systemen, waarmee gebeurtenissen voorafgaande aan een storing in een geheugen worden opgeslagen, zijn hiervan een voorbeeld.

## 4.3 Pompen

### Onderhoud

De belangrijkste onderdelen van centrifugaalpompen die vaak onderhoud behoeven, zijn:

- afdichtingen bij de asdoorgangen (70% van de gevallen): ten gevolge van slijtage;
- lagers die de pompas ondersteunen: ten gevolge van slijtage, onjuiste smering;
- waaiers: ten gevolge van cavitatie en erosie.

Als afdichting worden meestal zogenaamde mechanical seals of sleepringafdichtingen toegepast. In het laatste geval wordt de afdichting verkregen door twee ringen, een op de as en een in het huis, die door een veer worden aangedrukt. De smering tussen deze ringen wordt verzorgd door de procesvloeistof zonder dat de afdichting echt gaat lekken. Omdat het hier twee vlakken betreft die over elkaar wrijven, zijn sleepringafdichtingen onderhevig aan slijtage. Bovendien kunnen zij bij lekkage gaan vastzitten ten gevolge van kristallisatie van de vloeistof. De verende werking gaat dan verloren.

De voornaamste belastingen die op de onderdelen van een centrifugaalpompe werken zijn:

- radiale en axiale hydraulische belasting op de waaier, resulterend in lagerbelasting, asbelasting en asdoorbuiging; asdoorbuiging resulteert in krachten op onderdelen die verbonden zijn met de as;
- onbalans van de waaier, resulterend in lagerbelasting, asdoorbuiging en trillingen;
- een agressieve processtof veroorzaakt corrosie van waaier en huis;
- ruwe deeltjes in de processtof veroorzaken erosie en slijtage van waaier, huis en afdichting;

- bedrijf in een verkeerd werkpunt veroorzaakt te grote radiale belasting en daarmee versnelde slijtage van lagers en afdichtingen; verlaagde zuigdruk heeft cavitatie en daarmee erosie van de waaier tot gevolg;
- krachten op leidingen door thermische uitzetting of verkeerde montage belasten het pomphuis;
- door uitlijnfouten tussen pomp en aandrijfmotor worden koppeling, as en lagers onnodig belast.

Een van de belangrijkste problemen voor de ontwerper van een pomp is dat hij vaak onvoldoende bekend is met de belastingen die tijdens het bedrijf zullen optreden.

Anderzijds heeft de gebruiker die zelf een pomp en eventueel het fabrikaat wil kiezen, doorgaans nauwelijks gegevens over de belastbaarheid, bijvoorbeeld met betrekking tot de toelaatbare variaties in bedrijfscondities en de tijdsduur dat een pomp in een bepaald werkpunt mag draaien. Goede specificaties, zowel van de gebruiker als van de fabrikant, zijn dus van zeer groot belang.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

#### *A1 Verlaag de belasting*

Verlaging van de radiale belasting op de waaier is mogelijk door:

- keuze van de juiste pomp met betrekking tot het werkpunt, dus niet overdimensioneren (systeemontwerper);
- goed hydraulisch ontwerp;
- toepassing van dubbel slakkenhuis (vermindering van de hydraulische onbalans met ca. 50%);
- toepassing van zich verwijdende leidschoepen (vermindering van hydraulische onbalans met ca. 80%).

Verlaging van de belasting op het pomphuis is mogelijk door een goed ontwerp van de leidingen met het oog op expansie.

Verlaging van de belasting van koppeling, as en lagers kan worden bereikt door een goede uitlijning:

- montage van pomp en motor op een gemeenschappelijke fundatieplaat, die vrij over de fundatie kan schuiven;
- pomp met aangeflensde motor, met de waaier direct op de as van de motor, bij voorkeur verticaal opgesteld.

Bij pompen in de procesindustrie is de waaier vaak enkelzijdig gelagerd (overhangende waaier). Verlaging van de buigbelasting op de as is dan mogelijk door het lager binnen het pomphuis te monteren, zo dicht mogelijk bij de waaier, smering met de processtof, gebruik van moderne lagermaterialen en zo nodig toepassing van een bus van slijtvast materiaal op de as.

Door de wisselende buigbelasting op de pompas maakt de afdichting van het draaiende gedeelte van een sleepringafdichting een wisselende schuivende beweging ten opzichte van de as. Daardoor ontstaat slijtage, vaak ook aan de as. De belasting van deze afdichting kan worden verminderd, door deze optimaal te positioneren.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

De belastbaarheid van de as en de lagers door hydraulische krachten op de waaier en onbalanskrachten, kan eenvoudig worden vergroot door zwaarder te construeren. Dit werkt echter kostenverhogend en leidt bij de huidige tendens tot standaardisering van onderdelen tot overdimensionering van de kleinste pompen van een serie.

De weerstand van huis en waaier tegen corrosie en erosie kan worden verbeterd door de materiaalkeuze. Ook hierbij spelen de kosten een belangrijke rol. Een interessante nieuwe ontwikkeling op dit gebied is de geheel in kunststof uitgevoerde pomp.

De slijtage van sleepringafdichtingen en glijlagers kan worden verminderd door toepassing van keramische materialen voor de afdichtingsvlakken [40].

Lagerslijtage kan worden verminderd door glijlagers toe te passen in plaats van wentellagers (zie ook A6). Wordt een glijlager in het pomphuis gemonteerd, met smering door de processtof, dan kan de slijtage worden verminderd door hydrostatische in plaats van hydrodynamische smering. De pomp moet dan wel altijd voldoende tegendruk hebben. Voor het dimensioneren van hydrostatisch gesmeerde lagers zijn eenvoudige, betrouwbare rekentechnieken beschikbaar.

In gevallen waar volledige scheiding van de loopvlakken met een smeerfilm niet mogelijk is, kan verbetering worden bereikt door toepassing van moderne glijlagermaterialen met zelfsmerende eigenschappen.

De belastbaarheid van het pomphuis door leidingkrachten kan worden vergroot door zwaarder te construeren (kostenverhogend). In kritische gevallen zouden sterkte- of vervormingsberekeningen kunnen worden uitgevoerd.

Een andere ontwikkeling is een verbeterde versie van de stopbuspakking door deze uit te rusten met ringen uit sterke vezels, bijvoorbeeld aramidevezel, in plaats van met metalen ringen.

De 'lip-seal' (een flexibele lip die op de as drukt) kan bij toepassing van slijtvaste materialen mogelijk interessante oplossingen bieden.

#### *A3 Verklein de spreiding in de belasting*

De spreiding in de hydraulische belasting op de waaier en daarmee op de as en de lagers, kan worden verkleind door niet te regelen door smoren, maar door variatie van het toerental. Hiermee worden tevens

de gebruikskosten verlaagd (hoger rendement). Aandrijvingen met toerenregeling, zoals gelijkstroommotoren met thyristorregeling, zijn echter nog zo duur dat zij voorlopig slechts incidenteel en bij grote vermogens worden toegepast. Een prijsverlaging van de elektronische regelingen zou in de nabije toekomst wellicht een doorbraak kunnen betekenen.

Door toepassing van centrale olienevelsmering wordt een gelijkmatiger smering van de lagers verkregen, waardoor het aantal problemen met lagers sterk terugloopt. Met een centrale smering is men minder afhankelijk van het regelmatig bijvullen van het oliereservoir door onderhoudspersoneel.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Afhankelijk van de verhouding tussen mechanische bewerkingskosten en materiaalkosten, kan het aantal onderdelen worden verkleind door niet meer losse slijtonderdelen, zoals slijtringen, toe te passen, maar grotere onderdelen, zoals de waaier, geheel uit een slijtvaster materiaal te vervaardigen. Bij kleine pompen doet zich deze tendens inderdaad voor. Dit is echter strijdig met *C4: Verlaag de materiaalkosten*.

In dit verband kan ook worden gewezen op het belang van het zoveel mogelijk vermijden van pasvlakken en -randen. De maatvoering kan door vervuiling of corrosie worden verstoord waardoor bij reparatie fouten kunnen ontstaan.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Het optreden van cavitatie kan worden vermeden door zorgvuldig opstellen van de specificaties (systeemontwerper, gebruiker), een goed hydraulisch ontwerp en een goed systeemontwerp.

Een van de faalorzaken bij kogellagers is vermoeiing van de loopvlakken ('pitting'). Deze faaloorzaak kan vermeden worden door glijlagers toe te passen. In verband met de relatief hoge kosten daarvan wordt dat echter alleen gedaan bij machines in de grotere vermogensklassen. Indien een continue scheiding van de loopvlakken met hydrodynamische smering mogelijk is, kan lagerslijtage als faaloorzaak vrijwel geheel worden geëlimineerd. Dat zal in het algemeen het geval zijn bij installaties in continu bedrijf, die werken onder goed gedefinieerde omstandigheden.

Lagerslijtage kan als faaloorzaak geheel worden geëlimineerd door toepassing van magnetische lagers. Daarmee wordt tevens het smeersysteem als storingsbron vermeden. Juist om die redenen zijn er inmiddels op afgelegen locaties in Canada enkele centrifugaalcompressoren met magnetische lagering in bedrijf genomen.

Een onderhoudsarm ontwerp kan in principe worden verkregen door de aseinden niet meer door het pomphuis naar buiten te voeren en op

deze wijze de asafdichting te elimineren. Aan de niet-motorzijde kan dit worden gerealiseerd met een lager dat door de procesvloeistof wordt gesmeerd, bijvoorbeeld een glijlager bekleed met een keramisch materiaal. In de toekomst zal dit ook mogelijk zijn voor verontreinigde procesvloeistoffen. Wel bestaat steeds de noodzaak de as in axiale richting op te sluiten. Een contactloos axiaal lager is een axiaal kantelblokken glijlager, waarmee een lange levensduur kan worden bereikt. Meestal wordt nu voor de axiaalopsluiting nog een wentellager gebruikt. Een wentellager heeft weliswaar een kortere levensduur, maar een lagere kostprijs.

Om aan de motorzijde de sleepringafdichtingen te vermijden, moet de motor in de procesvloeistof draaien ('canned pump'). Deze oplossing is echter zeer duur en wordt daarom slechts toegepast bij agressieve of toxische procesvloeistoffen die beslist niet naar buiten mogen lekken, ook niet in dampvorm.

Sleepringafdichtingen aan de motorzijde kunnen ook worden vermeden met de magnetische koppeling. Uitlijnfouten hebben dan ook minder invloed. Daarvoor in de plaats komt echter een constructie-deel met een ongunstige faalkarakteristiek. De wand tussen de beide delen van de magnetische koppeling moet namelijk zo dun mogelijk zijn voor de overdracht van het aandrijfkoppel. Slijt deze wand, bijvoorbeeld door een ernstige uitlijnfout of door het losraken van een van de magneten, dan kan deze wand plotseling barsten.

Bij sleepringafdichtingen is de afdichting op de as (meestal een O-ring) vaak een bron van problemen. Deze kunnen worden vermeden door toepassing van een balg.

### *B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur*

Gebruikers blijken slechts beperkte belangstelling te hebben voor dit onderwerp. Daarom worden de fabrikanten van centrifugaalpompen nauwelijks gestimuleerd tot activiteiten op dit punt. De meeste gebruikers blijken nauwelijks geïnteresseerd te zijn in de exacte prestaties van een pomp en zijn zich vaak niet bewust van de achteruitgang daarvan. Het definiëren van de technische levensduur is dan op zichzelf al een probleem.

Daarbij speelt zeker een rol dat de mogelijkheden voor het voorspellen van de technische levensduur nog maar zeer beperkt zijn. Om de prestaties van een pomp te kunnen vaststellen, moeten de druk en het debiet voldoende nauwkeurig worden gemeten. Nu zijn drukmetingen relatief eenvoudig en nauwkeurig uit te voeren, maar nauwkeurige debietmeters zijn duur en moeten in het systeem worden ingebouwd. De interesse voor het volgen van de degradatie van de prestaties zou wellicht kunnen stijgen wanneer goedkope, eenvoudige en nauwkeurige debietmeters ter beschikking komen.



Soms worden in kritische toepassingen en bij de grotere vermogens sensoren aangebracht (*B3*) voor de conditiebewaking van bepaalde onderdelen, maar het maken van een degradatiekromme (*B2*) is nog nauwelijks mogelijk. Hierbij moet worden opgemerkt dat het weliswaar mogelijk is de geleidelijke verslechtering van een trillingsniveau te volgen, maar doorgaans ontbreekt de relatie tussen dat trillingsniveau en de mate van degradatie. Een van de weinige terreinen waar in bepaalde toepassingen succes wordt geboekt, is het volgen van de ontwikkeling van 'pitting' bij wentellagers. Ook hier ontbreekt echter een eenduidige relatie tussen gemeten waarde en mate van degradatie. De degradatie van een afdichting kan worden gevolgd door de lekvloeistof op te vangen in een vat met niveau-signalering en te registreren in welke tijd het ingestelde niveau, corresponderend met een bepaald lekvolume, wordt bereikt.

Een goede kwaliteitsbeheersing en het ontwerpen volgens vaste richtlijnen werken in de richting van verkleining van de spreiding in het einde van de levensduur (*B1*). Mogelijkheden voor het vaststellen van verbanden tussen ontwerpparameters en fabricagetoleranties enerzijds en levensduur anderzijds, zijn nog nauwelijks aanwezig.

#### *C Verlaag de kosten van instandhouding en herstel*

Voor verlaging van de kosten van instandhouding en herstel zijn er verschillende mogelijkheden. Het eerste wat de ontwerper op dit punt moet doen, is het ontwerp bewust beoordelen op onderhoudbaarheid en een korte reparatietijd (*C3*). Dit hoort zowel tot de verantwoordelijkheid van de pompontwerper, als tot die van de systeemontwerper. De pompontwerper kan bijvoorbeeld de reparatietijd verkorten door toepassing van modulaire bouwconcepten, zoals als eenheid uitwisselbare afdichtingen ('cartridge seals'). De systeemontwerper dient toe te zien op een goede toegankelijkheid van de component. Door standaardisatie van vervangingsdelen kunnen de materiaalkosten worden verlaagd (*C4*), vooral de voorraadkosten.

Verkleining van de diagnosetijd (*C2*) en vergroting van de diagnose-nauwkeurigheid (*C5*) hangen nauw samen. De diagnosetijd en de stilstandtijd kunnen worden verkort door onnodige demontages te voorkomen. Hierbij kunnen technieken voor conditiebewaking worden gebruikt. Deze zijn echter in het algemeen nog onvoldoende ontwikkeld om voor diagnosetijd en -nauwkeurigheid merkbare winst te kunnen boeken.

Naarmate bruikbare technieken beschikbaar komen, ontstaan er ook nieuwe mogelijkheden voor verkorting van de verplaatsingstijd (*C1*). Door bewaking en diagnose op afstand met behulp van telecommunicatieverbindingen, kan de reparatie optimaal worden voorbereid. Voor het overige liggen de mogelijkheden voor vermindering van de verplaatsingstijd nauwelijks op het terrein van de ontwerper.

*D Verminder de gevolgschade*

De mogelijkheden voor vermindering van de gevolgschade liggen voornamelijk op het systeemniveau, zoals het dubbel uitvoeren van componenten (D1), het aanbrengen van een buffer (D2) en het toepassen van compartimentering (D5). Overigens blijkt er in de procesindustrie een tendens steeds minder componenten (pompen) dubbel uit te voeren, steeds meer aandacht te geven aan de bedrijfszekerheid en bij kritische componenten conditiebewaking toe te passen.

*D2 Breng een buffer in het systeem aan*

Voorbeelden zijn het aanbrengen van een tank met smeerolie boven de machine, om bij een storing in het smeersysteem de toevoer van smeerolie nog gedurende enige tijd veilig te stellen en het aanbrengen van een reservetank met koelwater.

*D5 Pas compartimentering toe*

Een voorbeeld is 'disaster bushing', een bus met nauwe spleet om de as, waardoor bij een eventueel falen van de afdichting de lekstroom beperkt blijft.

*D6 Verklein de gevolgen van uitgesteld onderhoud*

Afhankelijk van de mogelijkheden voor conditiebewaking, wordt het uit bedrijf nemen van grote machines voor reparatie steeds vaker uitgesteld. Om de gevolgen daarvan te beperken, wordt bij een verdachte machine de ontwikkeling van het afwijkende gedrag nauwkeurig gevolgd (verband met B2). Het grote probleem daarbij is dat nog nauwelijks gegevens voorhanden zijn op basis waarvan het tijdstip kan worden bepaald waarop de machine uit bedrijf moet worden genomen.

#### 4.4 Ketels en procesfornuizen

##### Onderhoud

Bij ketels en fornuizen wordt gekeken naar dat deel waar de warmtewisseling plaatsvindt. Randapparatuur zoals pompen, ventilatoren, e.d. worden hier buiten beschouwing gelaten.

De voornaamste storingen zijn:

- bereiken van het einde van de levensduur door kruip;
- scheuren in hoogbelaste delen of delen met spanningsconcentraties;
- gevolgen van corrosie en erosie;
- schade aan bemetseling of isolatie.

De voornaamste storingsoorzaken zijn:

- plaatselijk hoge belastingen door ongelijkmatige verbranding;
- oververhitting door ongelijkmatige koeling;
- afwijkende belastingen bij starten en stoppen, belastingsveranderingen, draaien op deellast en overgang van de ene op de andere brandstof;
- vervuiling door de brandstof;
- onvoldoende kwaliteit van het ketelwater;
- moeilijk voorspelbare thermische schokbelasting;
- menselijk falen bij bediening en onderhoud.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

#### *A1 Verlaag de belasting*

Door betere beheersing van het proces (belasting van de ketel en het verbrandingsproces) mag worden verwacht dat minder onvoorziene belastingtoestanden zullen optreden.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Toepassing van geavanceerde rekentechnieken leidt tot beter inzicht in de belastbaarheid. Een beter inzicht in faalmechanismen, bijvoorbeeld door vorderingen in de breukmechanica, leidt tot een verlaging van het faaltempo.

#### *A4 Verklein de spreiding in de belastbaarheid*

De ontwerper zal zich veel moeite moeten getroosten om alle tijdens het gebruik optredende condities te kennen. Eerst dan is hij in staat een optimaal ontwerp te verzorgen [37].

#### *A7 Beïnvloed het gedrag van de onderhouder/gebruiker*

Gerichte instructie of opleiding door de ontwerper aan de gebruiker en de onderhouder dient te worden nagestreefd.

### *B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur*

Meer en betere gegevens over het gedrag van materialen in het kruipgebied zullen de voorspelbaarheid van de levensduur vergroten. Door de betere middelen van registratie en verwerking van de belastingen (druk en temperatuur) kan het degradatieproces beter worden gevolgd.

#### *C2 Verklein de diagnosetijd*

Door toepassing van breukmechanica in ontwerp en onderhoud kan de frequentie van periodieke inspecties beter gefundeerd worden verlaagd.

*D5 Pas compartimentering toe*

Door de pijpen in te klemmen, kan de ontwerper voorkomen dat bij pijpbreuk andere componenten worden beschadigd. Een nadeel is dat de bereikbaarheid voor inspectie afneemt.

**4.5 De gevolgen voor de onderhoudsdienst**

Hoewel de beschouwingen over componenten geen conclusies toelaten over de ontwikkeling van het totale bestand van onderhoudspersoneel in de procesindustrie, kunnen wel enkele kwalitatieve conclusies worden getrokken. Er is een gestage verlaging van het faaltempo van mechanische componenten. Gedeeltelijk zijn deze verbeteringen teniet gedaan doordat de componenten nu zwaarder worden belast. Verder is in de petrochemie de vermindering van het aantal werktuigbouwkundig geschoolde onderhoudsmensen teniet gedaan door een sterke uitbreiding op het gebied van instrumentatie en procesbeheersing.

---

## 5. Vliegtuigbouw

### 5.1 Inleiding

Vanwege het veiligheidsaspect hebben betrouwbaarheid en onderhoud in de vliegtuigwereld altijd veel aandacht gekregen. Bij KLM daalden de onderhoudskosten per tonkilometer van 11,5 cent in 1950 naar 1,5 cent in 1980. De conclusie zou kunnen zijn dat de onderhoudskosten niet veel meer omlaag kunnen. De scherpe concurrentie dwingt de luchtvaartmaatschappijen echter tot een steeds intensiever gebruik van hun vloot en tot kostenverlaging. Bovendien is door de lagere brandstofprijzen het aandeel van onderhoud in de Direct Operating Cost (DOC) gestegen. Een verdergaande druk tot verlaging van de onderhoudskosten is dus te verwachten. De DOC zijn identiek met de gebruikskosten zonder de gevolgschade.

In de Nederlandse burgerluchtvaart is slechts een klein aantal bedrijven actief. De grootste zijn Fokker, KLM, DAF, NLR. Via het Maintenance Steering Committee heeft de luchtvaartmaatschappij inspraak in de onderhoudseigenschappen van een nieuw te bouwen vliegtuig. Het is echter niet zo dat hij mee ontwerpt. Hij becommentarieert het ontwerp in de specificatiefase en in de beoordelingsfase. Ook stelt hij eisen aan de onderhoudskosten. De jaarlijkse onderhoudskosten bedragen 10 à 20% van de DOC, afhankelijk van de grootte van het vliegtuig en de ontwikkeling van de brandstofprijzen. Behalve via het Maintenance Steering Committee hebben de luchtvaartmaatschappijen invloed door internationale contacten met de collega-luchtvaartmaatschappijen en de vele overleg- en normbepalende organen waarin aan onderhoudseisen in het ontwerp aandacht wordt gegeven, zoals ARINC (Aeronautical Radio Inc.), SAE (Society of Automotive Engineers), ACMT (Aircraft Committee Materials Technology), IATA (International Air Transport Association).

De grote aandacht voor het veiligheidsaspect leidt er toe dat informatie uit het gebruik al sinds jaren effectief wordt teruggekoppeld naar de fabrikant. Dit is verplicht en geschiedt via het International Committee of Airline Operators (ICAO). Bovendien is de fabrikant verplicht het vliegtuig en zijn componenten te blijven volgen. Per component wordt de betrouwbaarheid bijgehouden en tevens in hoeverre de component de beschikbaarheid van het vliegtuig beïnvloedt. Zonodig wordt hierop actie genomen. Ook ten aanzien

van de constructie vindt een terugkoppeling van bevindingen plaats. De overheid stelt met luchtvaartwetten eisen aan de betrouwbaarheid. Zoals uit het voorgaande blijkt, is het contact tussen fabrikant, overheid en luchtvaartmaatschappij zeer intensief.

Als ontwerpdoelstelling hanteert men in de vliegtuigbouw maximale beschikbaarheid (de dispatch reliability (DR)) tegen zo laag mogelijk kosten. DR is het aantal malen dat een vliegtuig volgens het vluchtschema vertrekt, gedeeld door het totaal aantal vluchten. Daarbij worden alleen technische storingen gehanteerd als criterium voor niet op tijd vertrekken. De DR moet groter zijn dan 98%.

Reliability engineering vormt een theoretisch kader om de door de luchtvaartwetten geëiste betrouwbaarheid aan te tonen. Uit betrouwbaarheidsanalyses en beproevingen worden in een vroeg stadium waardevolle gegevens verkregen over het onderhoud. Op de grensvlakken van vakgebieden, bijvoorbeeld systemen en casco, levert reliability engineering nog wel eens problemen op. Nieuwe technische ontwikkelingen zoals nieuwe materialen of elektronische instrumenten kunnen leiden tot een vermindering van onderhoud omdat ze een langere levensduur hebben of minder preventief onderhoud nodig hebben.

Verder is in de luchtvaart een methode ontwikkeld voor het opstellen van een onderhoudshandleiding per subsysteem. Deze methodiek is vervat in het Maintenance Steering Group-document (MSG, huidige versie MSG-3) [45]. In MSG-3 wordt het vliegtuig verdeeld in casco en motoren en systemen. Voor elk van beide groepen wordt een logisch beslissingsdiagram gegeven voor het opstellen van onderhoudstaken. Daarbij is het van wezenlijk belang of een storing invloed heeft op de veiligheid of alleen kostenconsequenties heeft. Daarnaast wordt in het beslissingsdiagram onderscheid gemaakt of een storing waarneembaar is voor de bemanning of niet (voor het casco wordt onderscheid gemaakt tussen delen die van belang zijn voor de integriteit van de constructie en andere delen).

## 5.2 Onderhoud

De voornaamste delen die onderhoud behoeven zijn:

- het casco: door vermoeiing, corrosie, beschadiging door een van buiten komend voorwerp;
- de motoren: door slijtage, vermoeiing van de schoepen, beschadiging door een van buiten komend voorwerp, corrosie;
- systemen: bijvoorbeeld bij de hydraulische en pneumatische systemen: slijtage, corrosie en vermoeiing.

Volgens MSG-3 moet een onderhoudstaak 'applicable' (toepasbaar) en 'effective' (afdoend) zijn. Een bepaalde taak kan toepasbaar zijn, maar niet afdoend omdat de veiligheid niet voldoende wordt gewaarborgd of omdat de onderhoudstaak niet economisch is, of op zich onvoldoende. MSG-3 onderscheidt een aantal preventieve onderhoudstaken. Voor systemen zijn dat:

- doorsmeren/aanvullen van een verbruiksartikel;
- waarneming door de bemanning (zintuigen en instrumenten);
- beproeving van de werking;
- nagaan of het systeem binnen de tolerantiegrenzen werkt;
- herstel;
- vervanging;
- combinaties van genoemde taken.

Worden ondanks uitvoering van een van deze taken de criteria voor veiligheid niet gehaald, dan is een aanpassing van het ontwerp vereist. Wordt alleen maar aan de eisen van economie niet voldaan, dan is een aanpassing wenselijk.

Zo is de vervanging van onderdelen op regelmatige tijdstippen niet zinvol als het faaltempo constant is. Het faaltempo zal hierdoor namelijk niet afnemen. De component wordt dan immers vervangen door een andere met een gelijk faaltempo (zie afb. 5.1).

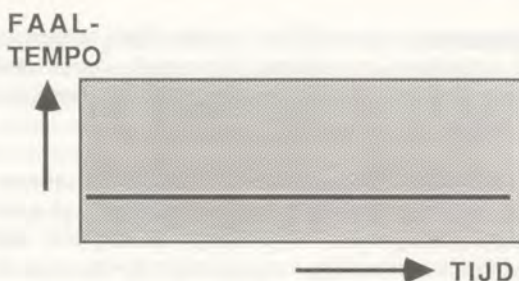
Alleen als het faaltempo van een bepaald tijdstip af sterk toeneemt (de oplopende flank aan het einde van de badkuipkromme), is vervanging op een vast tijdstip zinvol (zie afb. 5.2).

Wordt een component vervangen waarvan het faaltempo afneemt, dan wordt het faaltempo zelfs verhoogd (zie afb. 5.3).

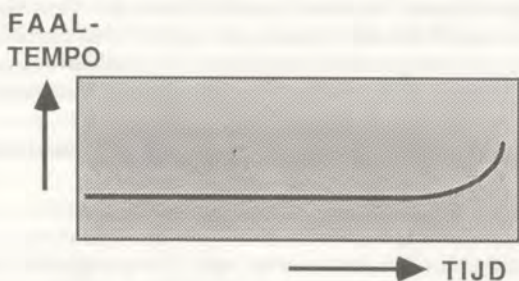
Uit recent onderzoek blijkt dat slechts 6 à 8% van de systemen gebaat is bij onderhoud op een vast tijdstip. Bij het casco en de motoren neemt het faaltempo wel toe als functie van de tijd. Daarvoor wordt een combinatie van toestandsafhankelijk en gebruiksaafhankelijk onderhoud toegepast.

### 5.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

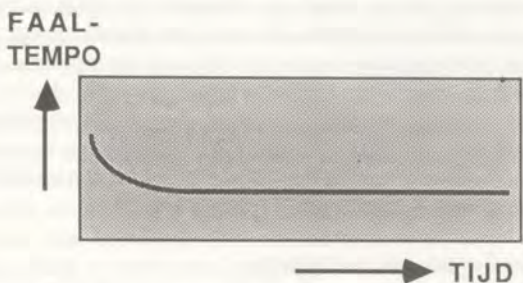
Tijdens de specificatiefase wordt een bepaalde DOC ten doel gesteld en de prestaties van het vliegtuig vastgelegd (zoals aantal passagiers, gewicht, brandstofverbruik, vliegafstand, luchtwaardigheidseisen en passagiersaccomodatie). De externe belastingen waaraan het casco blootstaat, worden vastgelegd in een belastingsspectrum. Keuzen met consequenties voor het onderhoud zijn die voor het materiaal van de romp en het soort instrumentatie (mechanisch of elektronisch). Het meenemen van het onderhoudsaspect in de specificatie wordt bemoeilijkt omdat onderhoud ten opzichte van bijvoorbeeld gewicht, kostprijs en weerstand niet zo eenvoudig is te kwantificeren. Omdat



Afb. 5.1 Component met constant faaltempo.



Afb. 5.2 Component met toenemend faaltempo.



Afb. 5.3 Component met afnemend faaltempo.

gewicht vaak de belangrijkste factor is, bestaat het risico dat het kwantificeerbare voordeel van een laag gewicht voorrang krijgt boven onderhoud. Met de Integrated Logistic Support-methode wordt het meenemen van betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid vanaf de specificatiefase nagestreefd. Deze methode – afkomstig uit de militaire luchtvaart – wordt in de burgerluchtvaart nog niet vaak toegepast. Soms wordt een getal gespecificeerd als eis voor de economische



levensduur ('economic repair life' of 'service life'), uitgedrukt in het aantal malen opstijgen en landen. Dit wordt vooral gedaan bij vliegtuigen voor de korte afstand, die per definitie een groot aantal cycli moeten halen.

In het algemeen zullen nieuwe ontwikkelingen niet alleen worden geïnitieerd uit overwegingen van onderhoud. Meestal gaat het om technische ontwikkelingen ter verbetering van gewicht, sterkte enz. die tevens leiden tot verbetering van het onderhoud. In verband met de veiligheid worden verbeteringen die uitsluitend zijn gericht op vermindering van het onderhoud vaak geleidelijk ingevoerd. Nieuwe materialen worden in de praktijk eerst beproefd op niet zo kritische plaatsen. Een wel specifiek voor het onderhoud geïnitieerde ontwikkeling vormen de IATA-richtlijnen voor corrosiebescherming zoals het vermijden van magnesium legeringen. Ontwikkelingen kunnen ook op gang komen als de beheerders een hogere betrouwbaarheid eisen.

Er worden enige voorbeelden gegeven van mogelijke maatregelen (zie afb. 1.3).

#### *A1 Verlaag de belasting*

De verwachting is dat toepassing van 'flat-panel displays' het faaltempo van instrumenten belangrijk zal doen afnemen [47].

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Nieuwe materialen zoals Arall en aluminium-silicium-legeringen verminderen de onderhoudsbehoefte van het casco omdat ze doorgaans minder gevoelig zijn voor corrosie en vermoeiing [50]. Het bewijs moet nog in de praktijk worden geleverd. Inspectie van composieten is moeilijker dan van de huidige aluminiumlegeringen omdat inwendige beschadigingen niet altijd resulteren in uitwendige scheuren, maar toch kunnen leiden tot aanzienlijke vermindering van sterkte en vermoeiingsweerstand.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Elektronische presentatie van vluchtgegevens in plaats van elektromechanische instrumenten doet het faaltempo en de behoefte aan preventief onderhoud belangrijk dalen.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

De vliegtuigontwerpen in de jaren negentig voorzien vermoedelijk niet meer in rechtstreekse hydraulische bediening van de besturingsorganen. In plaats daarvan worden stuurcommando's overgebracht door elektrische leidingen of glasvezelkabels ('fly by wire', 'fly by light'). Daarmee wordt het preventief onderhoud aan het hydraulisch

systeem vrijwel geëlimineerd. Daarvoor komt vermoedelijk een hoeveelheid storingsafhankelijk onderhoud aan het elektrisch systeem terug. Door het elimineren van de hydrauliek wordt bovendien gevolgschade aan de romp (aantasting van verflagen door lekkage) sterk verminderd.

In de ontwerpfasen worden – uitgaande van de specificaties voor het totale vliegtuig – de eisen bepaald voor de diverse componenten en de ruimtelijke configuratie vastgelegd. Componenten worden gedimensioneerd, dan wel op specificatie ingekocht. Indien nodig worden componenten onderworpen aan duurproeven. Een analytische berekening van de onderhoudsbehoefte is in deze fase in theorie mogelijk, mits voldoende gegevens over betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid uit eerdere ontwerpen of beproevingen van prototypen beschikbaar zijn. Deze berekening vormt een onderdeel van de ILS-methode en berust op inzichten en methoden uit de betrouwbaarheids- en onderhoudbaarheidstechniek. Deze berekeningsmethode heeft echter nog nauwelijks ingang gevonden. Wel wordt door vergelijking met voorgaande ontwerpen een schatting van de onderhoudsbehoefte gemaakt.

Als het ontwerp eenmaal gereed is, kan het in de beoordelingsfase worden beoordeeld op betrouwbaarheid en beschikbaarheid. Acht men verbeteringen nodig dan bedient men zich, al dan niet bewust, van de methoden uit afbeelding 1.3. Dit wordt aan de hand van enkele voorbeelden toegelicht.

Voor het bepalen van de onderhoudskosten tijdens de beoordelingsfase worden wel nieuwe technieken toegepast. Deze berusten op een vergelijking met eerder gebouwde vliegtuigen, waarvan de bedrijfskosten goed zijn vastgelegd, geleverd aan dezelfde luchtvaartmaatschappij. Bij nieuwe systemen worden onder andere de betrouwbaarheids- en onderhoudsgegevens van onderleveranciers vergeleken met de gegevens van de oude systemen.

Gedurende de eerste tijd dat een nieuw type vliegtuig wordt gebruikt, zal blijken dat bepaalde onderdelen een ongewenst storingsbeeld vertonen. Dan is het in een aantal gevallen nodig dat gebruiker en ontwerper overleggen hoe door aanpassing van het onderdeel het storingsbeeld kan worden verbeterd. Omdat veiligheid voorop staat, zijn de waarneembaarheid van storingen en het verminderen van de gevolgschade daarbij van groot belang.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Vochtverdrijvende deklagen beperken de corrosie aan de binnenzijde van de romp.

Vermindering van het aantal gaten in de cabinevloer, bijvoorbeeld door de keuken niet op de bevestigingsrails van de stoelen te

monteren, maar op vaste bevestigingspunten, vermindert de corrosie van de romp door schoonmaakmiddelen.

Toepassing van slijtvastere materialen voor de remblokken leidt tot verlenging van de technische levensduur.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Voorbeelden zijn gefreesde in plaats van samengestelde delen en geïntegreerde onderdelen vervaardigd uit composietmateriaal.

#### *A7 Beïnvloed het gedrag van de onderhouder/gebruiker*

Hoewel primair een taak van de beheerder, kan ook de ontwerper het gedrag van het onderhoudspersoneel in gunstige zin beïnvloeden door het verschaffen van relevante informatie.

Een goede toegankelijkheid en de mogelijkheid goed en goedkoop gereedschap te kunnen gebruiken, beïnvloeden het gedrag van de onderhouder in gunstige zin. Door vliegers informatie te verschaffen over het remmen op de wielen en op de motoren (omkeren van de stuwkracht van de motoren) kan het onderhoud aan remmen en motoren belangrijk worden verminderd.

#### *B2 Maak een degradatiekromme*

Door over te schakelen op het 'damage tolerance' principe kan een aanzienlijke verlenging van de gemiddelde levensduur van gasturbiniewielen worden verkregen. Het afbreukrisico wordt nu nog door de luchtvaartmaatschappijen onacceptabel gevonden.

In het algemeen worden steeds meer niet destructief onderzoek (NDO)-technieken toegepast.

Door van het hydraulische systeem regelmatig de lekkage te meten, kan degradatie van hydraulische componenten worden bewaakt.

#### *B3 Breng een sensor aan*

Dit wordt toegepast bij de motoren. Er wordt een aantal parameters van de motor gemeten om de conditie vast te stellen. Onder andere kan met magnetische sensoren die metaaldeeltjes uit de olie vasthouden excessieve slijtage en daarmee de noodzaak tot onderhoud worden vastgesteld.

Verder wordt het verbrandingsproces bewaakt.

#### *C2 Verklein de diagnosetijd*

Hiertoe wordt bij systemen veelvuldig gebruik gemaakt van 'built in testequipment' (BITE). Andere middelen zijn het storingshandboek ('fault isolation manual') en verbetering van testapparatuur. Deze verbetering bestaat onder andere uit het automatiseren van de beproevingen.

### *C3 Verklein de reparatietijd*

Het doorseinen van storingsgegevens naar de grond biedt de mogelijkheid de benodigde onderdelen gereed te leggen. Dit biedt overigens alleen voordelen als het om een defect gaat dat onmiddellijk moet worden verholpen.

De luchtvaartmaatschappij stelt een reeks van eisen ten aanzien van bereikbaarheid en onderhoudbaarheid. In het algemeen mogen inspectietijden een bepaalde duur niet overschrijden.

Door het gebruik van NDO-apparatuur kunnen kleinere scheuren in het casco worden gedetecteerd dan bij visuele inspectie. Dit maakt het mogelijk de intervallen tussen inspecties verder uiteen te leggen als dat in de onderhoudspolitiek van de luchtvaartmaatschappij past. Ook het overbrengen van de kracht via meerdere paden leidt tot een grotere flexibiliteit bij het vaststellen van de inspectie-intervallen. Door onderdelen modulair uit te voeren, is snelle verwisseling mogelijk. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de motoren.

### *C5 Vergroot de diagnosenaauwkeurigheid*

In de luchtvaart past men het Aircraft Integrated Data System (AIDS) toe. Gedurende de vlucht worden een groot aantal parameters (tot 900 toe) gemeten en later op de grond met een computer geanalyseerd op afwijkingen.

Storingen kunnen op deze manier sneller worden geanalyseerd, omdat de historie goed vastligt.

Het vinden van fouten in programmatuur is nog vaak een probleem omdat zij vaak onder specifieke en uitzonderlijke condities optreden die niet zijn voorzien door de ontwerper of niet zijn gespecificeerd door de luchtvaartmaatschappij [49].

### *D1 Voer onderdelen dubbel uit*

Dit wordt in de vliegtuigbouw bij systemen toegepast.

### *D4 Vergroot de voorspelbaarheid van de noodzaak tot onderhoud*

Met een microprocessor uitgeruste systemen kunnen zelf vaststellen wanneer er ergens in het systeem een defect optreedt. De inspecteerbaarheid van constructies dient zo goed mogelijk te zijn gewaarborgd.

### *D5 Pas compartimentering toe*

Het casco van een vliegtuig wordt zodanig ontworpen dat het optreden van scheuren niet onmiddellijk leidt tot het in gevaar brengen van de veiligheid. Dit kan worden bereikt door een kracht via meerdere paden over te brengen of door compartimentering. In het laatste geval worden op plaatsen waar scheuren worden verwacht, verstevigingen aangebracht (scheurstoppers).

Het uit bedrijf nemen van het vliegtuig wordt in de vliegtuigbouw

onder andere beperkt met behulp van de Minimum Equipment List (MEL). De vlieger kan met de MEL nagaan welke onderdelen defect mogen zijn zonder dat hij de vlucht hoeft af te breken.

---

## 6. Kantoorautomatisering

### 6.1 Inleiding

Kantoorwerkers gaan om met informatie. Hun staat apparatuur ter beschikking voor het genereren, opslaan, verkrijgen, bewerken en verspreiden van informatie.

Tot zo'n honderd jaar geleden waren pen en papier de enige technische hulpmiddelen die de kantoorwerker gebruikte. Sinds die tijd hebben echter vele meer gecompliceerde apparaten hun intrede gedaan. Voor communicatie kwam naast de brief de telegraaf en vervolgens de telefoon en de telex. De typemachine volgde de pen op. Na de rekenlineaal kwam de zakrekenmachine. De schriftelijke boekhouding verdween in de mechanische en vervolgens de elektronische boekhoud- en rekenmachine. Nieuwe technische ontwikkelingen maken dat deze afzonderlijke componenten in toenemende mate zullen worden geïntegreerd. Eindapparatuur zal worden gebruikt om brieven te genereren, berekeningen uit te voeren en te communiceren door elektronische post of met een intern of extern gegevensbestand. Deze ontwikkeling bepaalt in sterke mate het toekomstige karakter van het onderhoud. Behalve onderhoud aan componenten zal er veel onderhoud aan systemen zijn. Bij onderhoud aan systemen speelt het localiseren van de storing een overheersende rol en niet zozeer de werktuigbouwkundige of elektronische achtergronden.

In het nu volgende zullen twee machines worden behandeld die de kantoorwerker ondersteunen, namelijk het kopieerapparaat en de tekstverwerker. Vooral bij het kopieerapparaat, maar ook bij printers van tekstverwerkers speelt het mechanisch onderhoud nog een belangrijke rol in het ontwerpen. Daarna wordt kort ingegaan op enkele aspecten van onderhoud van programmatuur en kantoorssystemen.

### 6.2 Kopieerapparatuur

#### Inleiding

De markt voor kopieerapparatuur wordt meestal ingedeeld in drie segmenten

- laag volume (minder dan 20.000 kopieën per maand);
- midden volume (20.000-50.000 kopieën per maand);
- hoog volume (meer dan 50.000 kopieën per maand).

In veel gevallen wordt de machine onderhouden door de leverancier op basis van een onderhoudscontract. De klant kan zijn kosten in dit geval baseren op de prijs per kopie, die afhankelijk is van het aantal kopieën, de manier van aanschaf (kopen of huren) en de vorm van het contract (kosten per maand of per gemaakte kopie).

De fabrikant maakt een afweging tussen de kosten van vervaardiging van het produkt en de onderhoudskosten. Afgezien van zaken als kwaliteit van de kopie, zal de fabrikant een bij zijn doelstellingen passende beschikbaarheid trachten te realiseren bij een zo laag mogelijke kostprijs per kopie. Onder beschikbaarheid wordt bij kopieerapparatuur verstaan de totale werktijd verminderd met de tijden die verloren gaan tussen het melden van een klacht en het weer beschikbaar zijn van de gerepareerde machine, gedeeld door de totale werktijd. Aangezien een hoge beschikbaarheid zowel kan worden gerealiseerd door snelle serviceverlening als door een onderhouds-arm ontwerp, weegt de fabrikant deze mogelijkheden voortdurend tegen elkaar af. De ontwerp levensduur is zes jaar. Door de hoge innovatiesnelheid ligt de feitelijke gebruiksduur per klant echter in de orde van drie jaar. In een aantal gevallen wordt de apparatuur na een opknapbeurt verkocht aan een tweede eigenaar, die er bij een lagere prijs/prestatie verhouding nog geruime tijd mee kan werken.

Door de snelle opeenvolging van nieuwe modellen wordt het ontwerp qua betrouwbaarheid en levensduur slechts zover uitontwikkeld als met een redelijke inspanning in geld en tijd is te realiseren.

De onderhoudskosten als percentage van de aanschafprijs liggen in de orde van 15% per jaar.

### **Werkwijze en onderhoud**

De meeste van de thans gebruikte kopieerapparatuur maken gebruik van het elektro-fotografisch (ook wel xerografisch genoemd) procédé, uitgevonden door de Amerikaan Chester Carlson. Het kopieerproces bestaat uit vijf stappen:

- het maken van een elektrostatisch ladingsbeeld van het te reproduceren document op fotogeleidend materiaal;
- ontwikkeling van dit beeld met behulp van 'toner' (meestal een droog poeder);
- het overbrengen van het ontwikkelde beeld van de fotogeleider naar het papier;
- het fixeren of vastsmelten van het beeld op het papier;
- het reinigen van het fotogeleidend materiaal (zodat dit weer in de juiste uitgangstoestand wordt gebracht).

Het hart van een kopieerapparaat wordt gevormd door de fotogeï-leider. Dit is een cilindrisch of bandvormig element voorzien van een fotogeïleidende laag. Fotogeïleidende materialen zijn bijvoorbeeld selenium, bepaalde organische verbindingen, zinkoxide en cadmium-sulfide. Een stof wordt fotogeïleidend genoemd als deze in het donker elektrische stroom niet of zeer slecht geleïd (dus een isolator is) en in het licht elektrische stroom wel goed geleïd (dus een geleïder is). Tijdens het kopieerproces wordt de fotogeïleider eerst in het donker voorzien van een elektrostatiche lading, bijvoorbeeld door een corona-ontlading. Vervolgens wordt hierop met een aantal spiegels en lenzen een afbeelding van het te reproduceren origineel geprojecteerd. Die afbeelding bestaat uit donkere gedeelten, overeenkomend met de zwarte delen of beelddelen van het origineel en verlichte gedeelten, die overeenkomen met de witte delen van het origineel. Waar licht de fotogeïleider treft, wordt deze geleïdend en daardoor vloeit op die plaatsen de elektrostatiche lading weg. Op de fotogeïleider blijft dan een ladingsbeeld over dat precies overeenkomt met de zwarte delen van het origineel.

De belichting van het origineel kan geschieden met behulp van flitslampen, waarbij het origineel in een keer integraal op de fotogeïleider wordt afgebeeld. Een andere methode is de spleetbelichting, waarbij een smalle lichtband over het origineel loopt en wordt afgebeeld op een met dezelfde snelheid bewegende fotogeïleider. Deze belichtingsmethode vergt een aantal nauwkeurig regelbare bewegende delen en is daarom onderhevig aan mechanische slijtage en storingen. Het belangrijkste voordeel is dat spleetbelichting een veel compactere constructie toelaat.

Vervolgens wordt het ladingsbeeld op de fotogeïleider ontwikkeld door contact met de 'toner'. De tonerdeeltjes bestaan uit een mengsel van een smeltbare hars en koolstof. Om een goede aantrekkingskracht tussen ladingsbeeld en tonerdeeltjes te krijgen, wordt op de tonerdeeltjes een elektrostatiche lading aangebracht, die tegengesteld is aan die van het ladingsbeeld. Dit kan door de tonerdeeltjes te mengen met zogenaamde dragerdeeltjes, waartegen ze zich door wrijving tot de gewenste potentiaal kunnen opladen. Men spreekt in dit geval van een binaire ontwikkelaar (tonerdeeltjes plus dragerdeeltjes). Unaire toner bevat meestal ook nog magnetisch materiaal, wat nodig is voor het transport van de tonervoorraad naar de fotogeïleider. De samenstelling van unaire toner is dus ingewikkelder en daardoor zijn de produktiekosten veelal hoger. Binaire ontwikkelaar heeft als nadeel dat de dragerdeeltjes teruggevoerd moeten worden naar de tonervoorraad en dat de juiste mengverhouding tussen dragerdeeltjes en tonerdeeltjes moet worden bewaakt. Dit vergt extra processen en regelingen.

De volgende stap is het overbrengen van het ontwikkelde beeld van de



fotogeleader naar het papier. Meestal wordt daartoe het papier in contact gebracht met de fotogeleader terwijl het papier door corona-ontlading van een lading wordt voorzien. De toner wordt dan elektrostatisch van de fotogeleader naar het papier getrokken. Een andere methode is het gebruik van adhesie. In dat geval wordt de toner eerst overgebracht naar een overdracht- en fixeerbands en vervolgens van deze band naar het papier. In deze tweede stap wordt de toner tevens gefixeerd of vastgesmolten op het papier. Een voordeel van deze methode is dat direct contact tussen het ruwe papieroppervlak en de fotogeleader wordt vermeden, waardoor de fotogeleader minder onderhevig is aan mechanische slijtage.

Als het tonerbeeld elektrostatisch naar het papier is overgebracht, moet het beeld nog worden gefixeerd of vastgesmolten op het papier. Dit kan gebeuren met warmte, met druk of (meestal) met een combinatie van warmte en druk. Na deze stap is de kopie gereed en wordt deze naar buiten gevoerd.

De laatste stap is het reinigen van de fotogeleader. Overtollige toner, die niet naar het papier is overgedragen, wordt weggeborsteld en de restlading op de fotogeleader wordt verwijderd. Aldus wordt de fotogeleader weer in de juiste uitgangstoestand gebracht voor de volgende kopieercyclus.

De voornaamste redenen voor onderhoud zijn:

- vernieuwing van de fotogeleader;
- vernieuwing van de reinigingswalsen;
- problemen met de belichtingsinstelling;
- storingen in besturings- en regelcircuit;
- een invoerprobleem van originelen;
- onoordeelkundig gebruik door de gebruiker;
- papierstoringen.

De eerste vier zijn het gevolg van veroudering. Bij de laatste drie spelen triviale redenen een rol, zoals het niet goed inleggen van kopieerpapier, verkeerd papier en het in de machine belanden van vreemde voorwerpen zoals paperclips.

### **Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst**

Tijdens de specificatiefase worden de functionele kenmerken van het apparaat vastgelegd, zoals het aantal kopieën per minuut. Ook worden de onderhoudsaspecten bekeken van de toe te passen processen. In deze fase kunnen onder andere de volgende keuzen worden gemaakt:

- het materiaal van de fotogeleader;
- het type toner: unair of binair;

- belichting door flitsen of aftasten;
- beeldoverdracht elektrostatisch of mechanisch;
- een overdracht- en fixeerband of niet.

Vaak liggen principiële keuzen bij een fabrikant vast op grond van in het verleden genomen besluiten.

Bij het opstellen van de specificaties kan worden besloten principieel nieuwe materialen of componenten toe te passen, bijvoorbeeld fotogeleidermateriaal met een langere technische levensduur of een besturing met meer bewakings- of diagnosemogelijkheden.

De keuze van het fotogeleidermateriaal is bepalend voor de verdere procesgang. Door meer lokale intelligentie per componentgroep aan te brengen, kan men het aantal elektrische verbindingen tussen de componentgroepen sterk reduceren en daarmee het faalt tempo worden verminderd.

Tijdens de ontwerpfase worden aan de hand van de specificaties voor het totale apparaat de eisen voor de diverse functies bepaald. De componenten die deze functies moeten vervullen, worden vervolgens gedimensioneerd indien het een eigen produkt betreft of opgezocht in een catalogus van een toeleverancier, dan wel na overleg op specificatie vervaardigd door een toeleverancier.

In de beoordelingsfase wordt het ontwerp zodanig gemodificeerd dat een voldoende hoge betrouwbaarheid en onderhoudbaarheid wordt verkregen. In de eerste plaats zijn daarbij de functionele eigenschappen van belang. Vervolgens moeten de betrouwbaarheid en de beschikbaarheid worden geverifieerd, bijvoorbeeld met 'failure mode and effect analysis' (FMEA). Als in dit opzicht een probleem wordt gesignaleerd, zal een aantal oplossingen worden bedacht. Daarbij worden - veelal onbewust - de vier strategieën uit afb. 1.3 gehanteerd, te weten:

- verlaag het faalt tempo van componenten;
- verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur;
- verlaag de kosten van instandhouding en herstel;
- verminder de gevolgschade.

Door systematisch de methoden van afb. 1.3 toe te passen op alle componentgroepen, kan een zo gunstig mogelijk ontwerp worden gerealiseerd. De ontwerper kan deze gegevens uitzetten in een matrix om te verifiëren of hij alle methoden op alle componentgroepen heeft toegepast.

De ontwerper kan daarbij kiezen voor een oplossing binnen de component, maar hij kan ook door wijzigingen in de procescondities of een andere component de belasting van de beschouwde componenten trachten te verbeteren.

Aan de hand van een aantal voorbeelden wordt dit keuzeprocess toegelicht.

*A Verlaag het faaltempo van componenten*

De levensduur van de fotogeleader kan worden verlengd door een materiaal te kiezen met een langere levensduur. Ook de toepassing van de overdracht- en fixeerbands verlengt de levensduur, omdat de slijtage van de fotogeleader belangrijk wordt verminderd. Deze overdracht- en fixeerbands behoeft wel zelf onderhoud, maar de dure fotogeleader gaat veel langer mee, zodat toch een netto besparing wordt bereikt. Ook bij toepassing van een overdracht- en fixeerbands blijft het zaak de slijtage aan de fotogeleader zo laag mogelijk te houden. Voorts moet de ontwerper voorkomen dat vreemde voorwerpen, zoals paperclips, beschadiging van de fotogeleader veroorzaken. Behalve slijtage is verwarming een oorzaak van veroudering van de fotogeleader. De verwarming kan op een aantal manieren worden beperkt, onder andere door de fotogeleader te koelen. Veroudering wordt ook veroorzaakt door het elektrisch laden en ontladen. De elektrische belasting kan worden verlaagd door de fotogeleader slechts gedeeltelijk op te laden in plaats van maximaal. Dit werkt uiteraard kostenverhogend omdat een regeling nodig is.

*B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur*

Om tot een goede definitie van de levensduur van componenten te komen, moet de ontwerper onderscheid maken tussen tijdsafhankelijke degradatie en degradatie gerelateerd aan het functioneren van de apparatuur. Relevante grootheden zijn het aantal kopieën, het aantal bedrijfsuren en het aantal draaiuren (het aantal uren dat het kopieerapparaat is ingeschakeld, resp. het aantal uren dat daadwerkelijk kopieën worden gemaakt).

Enkele nieuwe mogelijkheden om de veroudering van componenten vast te stellen, zijn:

- Meting van het ladingsniveau van de fotogeleader.
- Bewaking of het apparaat en zijn componenten binnen de toegestane tolerantieband functioneren. Als bepaalde componenten ten gevolge van veroudering qua instelling weglopen kan de nadering van de grenzen worden gedetecteerd.
- Bewaking van de opgenomen stroom van de aandrijfmotoren. Als de opgenomen stroom toeneemt is dit een teken van slijtage of een defect aan het aandrijfsysteem.
- Registratie van het aantal mislukte flitsen van de flitsbuis. Dit is een maat voor de veroudering van de flitsbuis.
- Registratie van het aantal ingrepen in de belichtingsstand. Dit duidt op het teruglopen van de kopieekwaliteit.

Overigens kan selectieve registratie van ingrepen door de gebruiker gegevens opleveren over de manier waarop de gebruiker met het apparaat omgaat, zodat de ontwerper daarmee rekening kan houden.

*C Verlaag de kosten van instandhouding en herstel*

Tegenwoordig hebben de meeste kopieerapparaten een diagnosesysteem. Daarmee kan de gebruiker in een aantal gevallen vaststellen wat de oorzaak van de storing is. Voor problemen waarbij de onderhoudsmonteur moet komen, kan het telefonisch doorgeven van een storingscode een indicatie geven van de aard van het defect. In de toekomst zal het wellicht mogelijk zijn de leverancier de aard van een aantal storingen op afstand te laten vaststellen door het apparaat te koppelen aan het telecommunicatienet. Of alle storingen in de toekomst op afstand zijn te detecteren hangt af van de mogelijkheid zeldzame en door de ontwerper niet voorziene storingen op afstand te diagnostiseren en van de kosten.

*D Verminder de gevolgschade*

Een methode om de omvang van de schade te beperken is het aan de hand van een systematische analyse van mogelijk faaloorzaken en hun waarschijnlijkheid van optreden na te gaan wat de gevolgen van falen van een component zijn voor het gehele apparaat en die in het ontwerp te betrekken. Voorbeelden zijn:

- voorkomen dat doorslag van de flitsbuizen de voedingen of de besturing beschadigt;
- toepassing van kortsluitvaste laagspanningsvoedingen;
- begrenzing van de motorstroom;
- afschakeling van hittebronnen bij te hoge temperatuur;
- stilstandsdetectie voor delen die moeten draaien;
- doorkopiëren als er een storing in een randmoduul optreedt (vermijden van gevolgschade voor de klant).

**De consequenties voor de onderhoudsdienst**

Kopieerapparatuur vertoont de tendens steeds complexer te worden. Vooral de introductie van elektronica roept van storingen op die slechts zo nu en dan optreden. Dit gebeurt onder andere omdat de ontwerper bepaalde combinaties van toestandsvariabelen niet heeft voorzien. Bij gesloten regellussen is de oorzaak van de storing vaak moeilijk vast te stellen. Van alle storingen is 90% door de ontwerper voorzien. Deze kunnen met behulp van diagnose-apparatuur worden opgelost door de klant of door een laag opgeleide monteur. De overblijvende storingen vragen een hoger opleidingsniveau dan vroeger gebruikelijk was in het onderhoud. Een probleem is dat het verhelpen van deze storingen onevenredig duur is en de gemiddelde kosten van onderhoudscontracten sterk verhoogt.

De verwachting is dat de tijd voor onderhoud per kopie de komende jaren zal afnemen. Aangezien het kopieervolume echter sterker stijgt dan de onderhoudsbehoefte daalt, neemt de werkgelegenheid in deze sector nog toe.

Volgens een recent rapport van het Stanford Research Institute bedroeg het aantal kopieerapparaten in Nederland in 1984 ca. 175.000. Bij een gemiddelde aanschafprijs van 15.000 gulden (dit bedrag is tentatief) en een jaarlijks onderhoudspercentage van 15% wordt aan onderhoud van kopieerapparatuur dus ca. 400 miljoen gulden besteed [55].

### 6.3 De tekstverwerker

#### Inleiding

In de kantoorautomatisering neemt tekstverwerking een zeer belangrijke plaats in. Zonder twijfel is de tekstverwerker, als vervanging van de schrijfmachine, al het meest ingeburgerd. Anders dan de hiervoor beschreven kopieerapparatuur, is een tekstverwerker moeilijker te beschrijven als een fysiek apparaat. Immers, tekstverwerking is een toepassing die, op zich, gebonden kan zijn aan veelsoortige apparatuur, variërend van klein tot groot. Het kleinste type computer waarop tekstverwerking mogelijk is, ligt in de sfeer van consumentenartikelen, zoals homecomputers, maar tekstverwerking is ook mogelijk als een van de vele processen in een groot computersysteem met daaraan gekoppelde eindstations.

Gelet op de huidige ontwikkelingen zou het dan ook onjuist zijn tekstverwerking uit dit pakket te lichten en de onderhoudsbehoefte van het gastapparaat te koppelen aan deze zelfstandige toepassing.

#### Werkwijze en onderhoud

Teneinde het terrein toch enigszins af te bakenen kan bij een tekstverwerker in een professionele omgeving worden gedacht aan een apparaat met de volgende minimale eigenschappen:

- een 16 bits brede microprocessor;
  - een intern geheugen van minimaal 256.000 bytes;
  - een of meer externe opslagmedia, meestal diskettes;
  - een alfanumeriek toetsenbord met daarbij functietoetsen specifiek voor tekstverwerking;
  - een beeldscherm met een capaciteit van ten minste 24 regels van 80 tekens;
  - een printer met een op de toepassing afgestemde letterkwaliteit.
- Veelal is de hier beschreven configuratie ondergebracht in vier met kabels aan elkaar verbonden separate componenten:
- de centrale verwerkingseenheid met microprocessor, intern geheugen, systeemschijf, voeding en aansturing van de randapparatuur;
  - het toetsenbord;

- het beeldscherm, waarbij meestal geen kleurenbeeldbuis wordt toegepast;
- de printer.

Net als bij de kopieerapparatuur zijn ook hier mechanische componenten het meest onderhevig aan degradatie als gevolg van slijtage, vervuiling, het verlopen van afstellingen enz. Het aantal van dit soort gevoelige componenten ligt bij een tekstverwerker echter lager dan bij een kopieermachine.

De meest kritische componenten zitten in de systeemschijf en de printer, zoals bijvoorbeeld lees/schrijfkop, stappenmotoren en hun aansturing, printkop, inktlintransport, papiertransport. Ook bij deze componenten is de tendens het aantal onderdelen te verminderen en te vervangen door elektronische functies. Een voorbeeld is de aandrijfmotor voor de diskette. Die bestaat uit slechts twee onderdelen, namelijk een printplaat met daarop gemonteerde elektronisch aangestuurde spoelen en daarboven een metalen schijf als rotor.

Ondanks de duidelijk stijgende betrouwbaarheid van de componenten zal de onderhoudsbehoefte bij tekstverwerkers blijven bestaan en zich stabiliseren op een bepaald niveau. Dat niveau wordt bepaald door verkeerd gebruik en belastingen van buitenaf. Bekend zijn de paperclips in het printermechaniek, koffie in het toetsenbord en potloodslijpsel of suiker in het hoesje van de diskette.

Met het populariseren en gebruikersvriendelijk maken van tekstverwerking neemt de kans op dit soort storingen toe. De gebruiker heeft steeds minder kennis van de apparatuur en de complexiteit van de apparatuur neemt toe omdat de ontwerper de gevolgen van ondeskundig gebruik tracht te minimaliseren. Dat betekent dat gebruikers er in normaal bedrijf goed mee kunnen omgaan, maar een afwijkende toestand als storing ervaren. Ten aanzien van dit soort situaties hangt veel af van de gebruikersvriendelijkheid en de ergonomie van het ontwerp.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

In de specificatiefase worden de aan het apparaat te stellen eisen getoetst aan de toekomstige gebruikersomgeving en te volgen onderhoudsfilosofie.

Tijdens de ontwerpfase is de 'bandbreedte' van de toe te passen techniek beperkt. Veelal worden componenten zoals printers, toetsenbord en disketteloopwerk als complete eenheid ingekocht.

Vanzelfsprekend is de uiteindelijke betrouwbaarheid het resultaat van de betrouwbaarheid van de toegepast onderdelen. Een zorgvuldige selectie van toeleveranciers is dus belangrijk en moet mede worden beoordeeld op de kwaliteit van de betreffende componenten.

Ook kan de toekomstige hersteltijd van het apparaat worden verlaagd door modulair ontwerp, goede en duidelijke foutdetectie en eenvoud van reparatie. Verder moeten goede en duidelijke bedieningsvoorschriften worden meegeleverd. Dan kan het aantal storingen ten gevolge van verkeerd gebruik laag worden gehouden.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

De ontwikkeling op het gebied van aandrijfmotoren voor de schijf werd al genoemd. Ook bij printers is het aantal onderdelen in de loop der jaren sterk verminderd.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Bij de printer is de slijtage als storingsoorzaak te vermijden door over te gaan op statische principes zoals in elektrostatische of inktstraalprinters.

### **Consequenties voor de onderhoudsdienst**

Omdat het grootste aantal storingen het gevolg is van bedieningsfouten, is de bijdrage van technische verbeteringen aan de vermindering van de onderhoudsbehoefte gering.

Het rapport van het SRI spreekt van 217.000 terminals in 1983 [55]. Er van uitgaande dat ongeveer 40% daarvan staat in bedrijven met 1-9 werknemers komt dit getal overeen met de CBS-statistieken [53]. SRI verwacht een groei van dit aantal tot 1990 van 40% op jaarbasis. Dit is gelijk aan de verwachting van het CBS in de jaren 1984 en 1985. Onderhoud in deze sector zal dus nog aanzienlijk toenemen.

## **6.4 Programmatuur**

### **Inleiding**

Bij programmatuur wordt aan het woord onderhoud in het algemeen een andere betekenis toegekend dan in de inleiding (1.2) is aangegeven. Een programma vervult een bepaalde functie en wordt in veel gevallen voortdurend aangepast aan de evoluerende functie-eisen. Om in apparaattermen te spreken: een auto wordt niet afgedankt, maar voortdurend omgebouwd zodat hij voldoet aan nieuwe milieueisen, klantenwensen en technische ontwikkelingen. Het bedrag voor ombouw is uiteraard vele malen groter dan het zuivere onderhoud. Het echte onderhoud aan programmatuur wordt veroorzaakt door onvolledigheden in de specificatie en ontwerpfouten. Slechts bij hoge uitzondering is een programma honderd procent correct. De te bereiken nauwkeurigheid is voornamelijk een kwestie van de hoeveel-

heid geld die de klant daaraan wenst te besteden en de mate waarin een probleem zich laat vastleggen in algoritmische, vastomlijnde specificaties.

Daarnaast is het vaak nodig de gegevens op geheugenschijven te reorganiseren omdat delen van het programma door aanpassingen of bijbehorende gegevens zo verspreid op de schijf staan dat de toegankelijkheid sterk terugloopt. Ook moeten er soms reparatiewerkzaamheden worden uitgevoerd als programmatuur bij een crash of bedieningsfout ontoegankelijk is geworden.

### Onderhoud (volgens de ruime definitie)

De verdeling van het onderhoud van programmatuur is als volgt [52]:

- wijzigingen door gebruikers gewenst, bijvoorbeeld toevoeging van een functie: 41,8%
- aanpassingen aan wijzigingen in gegevenstoevoer en -opslag (bijvoorbeeld omdat de girodienst overgaat van ponskaarten op gedrukte kaarten): 17,4%
- verhelpen van fouten in de programmatuur: 12,4%
- opzoeken van fouten: 9,3%
- aanpassingen aan wijzigingen in apparatuur en besturingssysteem (bijvoorbeeld een ander beeldscherm): 6,2%
- verbetering van de documentatie: 5,5%
- efficiënter maken van het programma: 4,0%
- rest: 3,4%.

Van deze opsomming zijn alleen het verhelpen van programmafouten en het opzoeken van fouten onderhoud volgens de definitie uit hoofdstuk 1.2.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

Tijdens de specificatiefase is het grote probleem te komen tot eenduidige en volledige specificaties. Hieraan moet zowel van de zijde van de klant als van de ontwerper grote aandacht worden gegeven. De ontwerper moet veel aandacht schenken aan een goede en duidelijke methodiek in de analyse. Het verdient aanbeveling bij een complex ontwerp eerst een prototype van het ontwerp te maken. Op grond van de ervaringen met het prototype kunnen de specificaties worden aangevuld of gewijzigd.

In de ontwerpfase moeten de specificaties worden vertaald in een ontwerp. Belangrijke keuzen zijn de probleemstructurering en het al dan niet modulair opbouwen van de programmatuur. Daardoor wordt onder andere vermeden dat een wijziging in een deel van het programma invloed heeft op andere delen, zodat ook daar wijzigingen zouden moeten worden aangebracht.



De consistentie van het ontwerp – voldoet het wel aan het gestelde doel – is essentieel.

Bovendien moet de ontwerper voldoen aan de systeemspecificaties en een efficiënt werkend programma maken.

In de beoordelingsfase kunnen methoden uit afbeelding 1.3 worden gebruikt om het onderhoud te verminderen.

#### *A Verlaag het faaltempo van componenten*

Een betere kennis van de gebruiksomgeving kan in belangrijke mate bijdragen de specificaties zo volledig mogelijk te krijgen en dus storingen te vermijden.

Daarnaast wordt gewerkt aan formele juistheidsbewijzen van programmatuur. Dit houdt in dat de probleemstelling op hoog niveau in algoritmen wordt vastgelegd. Bij het gaan naar een lager niveau (detaillering) kan worden bewezen dat de som der onderdelen gelijk is aan het hogere niveau. De juistheid van de algoritmen op het hoogste niveau is zo echter niet te verifiëren. Daarvoor is een optimale communicatie tussen gebruiker en ontwerper vereist. Verder zal modulair opbouwen een gunstige invloed op het faaltempo hebben, omdat beproeving van de programmatuur sneller en overzichtelijker wordt.

#### *C Verlaag de kosten van instandhouding en herstel*

Hiervoor geldt dat systematische en modulaire opbouw de snelheid van de diagnose aanmerkelijk opvoeren. Goede documentatie is erg belangrijk.

#### *D Verminder de gevolgschade*

Hoewel dit bij kantoorautomatisering niet aan de orde is, kan programmatuur ongevoelig worden gemaakt voor fouten door tolerantie in te bouwen voor storingen. Daartoe moeten detectiemogelijkheden in de programmatuur worden aangebracht die in geval van een fout het systeem naar een veilige situatie sturen.

### **Conclusie**

Onderhoud van programmatuur is nog nauwelijks onderzocht als een kostenpost waar bij aanschaf al over moet worden nagedacht.

Volgens het IDC wordt in Nederland jaarlijks ongeveer vier miljard gulden aan programmatuur besteed (1986) [54]. Hiervan wordt ongeveer drie miljard gulden besteed aan onderhoud (in ruime zin inclusief wijzigingen).

Aan het opzoeken en herstellen van fouten wordt dan volgens Boehm jaarlijks ongeveer 600 miljoen besteed [52].

## 6.5 Kantoorssystemen

### Onderhoud

Bij complexe kantoorssystemen verandert de onderhoudsproblematiek van karakter. Hoewel componentenonderhoud daarin een rol speelt, is bij een enigszins omvangrijk systeem het vermijden van ontwerpfouten en het inbouwen van een goede mogelijkheid voor het detecteren, diagnosticeren en lokaliseren van fouten het belangrijkste probleem. De defecte component kan altijd worden uitgewisseld en elders gerepareerd.

Onder detecteren verstaan we het vaststellen dat er een fout optreedt. Diagnostiseren is het vaststellen van de oorzaak van deze fout.

Lokaliseren ten slotte is het vaststellen van de fysieke lokatie van de fout.

De hulpmiddelen die de ontwerper in zijn ontwerp inbouwt, moeten zijn afgestemd op het niveau van degenen die de detectie, diagnose en het lokaliseren verrichten. De ontwerper kan als de organisatie dit toelaat zelfs alternatieven aandragen, variërend van veel diagnosehulpmiddelen en laag geschoolde onderhoudsmensen tot weinig diagnosehulpmiddelen en hooggeschoolde technici. De keuze wordt onder andere bepaald door de seriegroote. Men moet daarbij beseffen dat er door onvolledigheden in de specificatie altijd een aantal fouten overblijft die alleen door een hooggeschoolde technicus kunnen worden opgelost. De kwaliteit van de detectie- en diagnosehulpmiddelen kan worden gekarakteriseerd met vier begrippen:

- de betrouwbaarheid van de detectie; welk percentage van de optredende foutbeelden wordt gedetecteerd?
- de detectiedichtheid: worden alle operaties van het systeem gecontroleerd of gebeurt dit slechts eens in de zoveel tijd?
- de detectietijd: de tijd die verloopt tussen het optreden en het detecteren van de fout;
- de detectiediepte: detectie van storingen aan componenten, een verzameling componenten of het complete systeem.

### Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

#### *B Verhoog de voorspelbaarheid van het einde van de technische levensduur*

Dit is vrijwel alleen interessant bij mechanische systemen. Een voorwaarde is dat de onderhoudspolitiek erop wordt afgestemd door onderdelen regelmatig preventief te vervangen of te inspecteren.

#### *C2 Verklein de diagnosetijd*

Dit wordt bij systemen onder andere gerealiseerd door een modulaire

opbouw, waardoor deelprocessen worden afgeschermd tegen elders optredende fouten, en door een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid van de detectie.

*C3 Verklein de reparatietijd*

De detectiediepte moet zijn afgestemd op het niveau van de uitwisselbare eenheden.

*C5 Vergroot de diagnosenaauwkeurigheid*

Door meer diagnostische hulpmiddelen in te zetten kunnen het niveau en daarmee de loonkosten van de monteur lager worden.

*D5 Pas compartimentering toe*

Discipline van de gebruikers ten aanzien van 'backing up' procedures kan de schade bij een systeemstoring verminderen. Beter is uiteraard 'backing up' automatisch te laten plaatsvinden als de tekst wordt geprint.

Belangrijk is hoe snel een systeem na een storing weer in bedrijf kan worden gesteld, bijvoorbeeld doordat de toestand vlak voor de storing in een geheugen is vastgelegd. Dit kan worden verwezenlijkt door vergroting van de detectiediepte en verkleining van de detectietijd. Door deelfuncties te bewaken wordt de uitstraling van een fout verminderd.

## 7. Wasmachines

### 7.1 Inleiding

Van alle huishoudelijke apparaten uit de zogenaamde witgoedsector (wasmachines, afwasmachines, drogers, koelkasten) heeft de wasmachine het meeste onderhoud nodig. Het SWOKA-rapport over bezitsduurkosten voor wasmachines niet ouder dan 10 jaar (1985) komt op één reparatie in de vier jaar [58]. Een andere analyse, gebaseerd op 15.000 apparaten, komt uit op 1,5 reparatie in de vier jaar (voor wasmachines niet ouder dan 4 jaar) [61].

Hetzelfde onderzoek stelt vast dat het aantal storingen de laatste tien jaar ongeveer constant is gebleven. Wasmachines worden dus qua onderhoudsbehoefte niet beter en niet slechter. Wel is er tussen verschillende fabrikaten een verschil in reparatiefrequentie van een factor drie.

De wasmachine is een relatief goedkoop apparaat. De reparatiekosten zijn hoog ten opzichte van de aanschafprijs. Daarom is de ontwerpfilosofie van de meeste fabrikanten gericht op een onderhoudsarm ontwerp. De repareerbaarheid komt duidelijk op de tweede plaats.

In principe is de werkwijze van de wasmachine de laatste jaren ongewijzigd gebleven, hoewel recent door een aantal fabrikanten een nieuw proces met een lager energie- en waterverbruik is geïntroduceerd. De wasmachine is derhalve een uitontwikkeld produkt. De ingrijpendste storingen, zoals doorroesten van de kuip, zijn vrijwel geëlimineerd. De gemiddelde werkelijk bereikte levensduur bedraagt circa twaalf jaar [60].

### 7.2 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

Wasmachines worden ontworpen volgens een gedetailleerde specificatie, zowel voor elke component als voor het apparaat als geheel. Deze specificatie is gebaseerd op de gemiddelde gebruiks- en omgevingscondities. De machine moet onder deze omstandigheden een bepaald aantal wasbeurten kunnen verrichten zonder ernstige storingen te vertonen. Dit aantal varieert voor de verschillende fabrikanten van 2500 tot 5000 wasbeurten. Bovendien moet het apparaat gedurende een beperkte tijdsduur bepaalde extreme condi-

ties, zoals netspanningspieken en onderspanning, met goed gevolg kunnen doorstaan.

In de specificatie is ook een aantal proeven voorgeschreven zoals:

- een versnelde beproeving van mechanische componenten op slijtage of vermoeiing;
- een versnelde beproeving onder gestandaardiseerde extreme klimatologische condities teneinde de corrosie- en verouderingsbestendigheid te verifiëren.

Het resultaat van deze proeven is de zekerheid dat de meeste apparaten een bepaalde technische levensduur (uitgedrukt in wasbeurten) halen.

Tijdens de beoordelingsfase bieden de methoden uit afbeelding 1.3 mogelijkheden de onderhoudskosten te verlagen. Dit wordt toegelicht met enkele voorbeelden.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Toepassing van nieuwe materialen zal geen invloed hebben op de werkelijk bereikte levensduur van wasmachines. Bij de huidige verhouding tussen prestatie en prijs zijn er geen dwingende redenen over te gaan tot verlenging van de ontwerplevensduur. Daarom zullen nieuwe materialen worden gebruikt om het faaltempo van storingsgevoelige onderdelen of de kostprijs te verlagen. Een voorbeeld is de toepassing van neopreen slangen.

#### *A3 Verklein de spreiding in de belasting*

Bij een uitontwikkeld produkt als de wasmachine is het vergaren van systematisch inzicht in storingsoorzaken tijdens het gebruik de beste methode om tot vermindering van het faaltempo te komen. Storingen zijn voornamelijk te wijten aan een veelheid van kleine onvolkomenheden in het ontwerp, zoals

- tolerantieproblemen;
- geen rekening houden met condens;
- lak die inwerkt op kunststof;
- nieuwe wasmiddelen die op de lange termijn het gedrag van schakelcontacten negatief beïnvloeden;
- rubbers met te hoge isolatieweerstand.

Deze kennis wordt bij wasmachines verkregen door:

- Gestandaardiseerde beproeving in het laboratorium op technische levensduur, gebruikersvriendelijkheid, reinigingsgedrag, kleddingslijtage enz.
- Door korte proeven in een normale gebruiksomgeving (in de regel een aantal geselecteerde gezinnen). Deze proeven zijn hoofdzakelijk bestemd voor het opdoen van ervaring met nieuwe typen en toegesneden op de te verwachten problemen. Men verkrijgt

- specifieke en snelle informatie die echter beperkt is qua tijdsduur en breedte van de informatie.
  - Informatie over de volle breedte wat betreft
    - verkoopprogramma (in principe alle typen)
    - landen (in principe alle belangrijke landen)
    - leeftijd van de apparaten.
- Wil deze informatie zinvol zijn, dan is detaillering naar specifieke problemen en somming nodig. Dit is alleen mogelijk met een strak gehandhaafd computersysteem. Bij bestudering moet rekening worden gehouden met foutenbronnen (doe het zelf, grijze onderdelenmarkt, niet-officiële import, manipulatie tussenhandel, service uitbesteed bij derden enz.).
- Gedetailleerde en geverifieerde informatie over een beperkt deel van de verkochte apparaten gedurende langere tijd. De uitkomsten geven informatie, waarop foutenanalyse kan worden gebaseerd. Tevens kunnen ze dienen om de voorgaande proeven aan te passen. Gezien de hoge kosten wordt slechts een beperkt aantal apparaten gevolgd. Het is vooral uit de nauwkeurige analyse van foutoorzaken uit dit soort proeven dat ontwerpverbeteringen naar voren komen.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Behalve waarde-analyse en 'failure mode and effect analysis' is er een methode 'design for assembly', die het montageproces van een (consumenten) produkt nauwkeurig analyseert [56]. De methode bedoelt door vermindering van het aantal onderdelen en eenvoudiger montage de fabricagekosten te verlagen. De eenvoud van montage wordt onder andere bepaald door het gemak waarmee een onderdeel is op te pakken en of het in een bepaalde positie moet worden gedraaid (een rotatiesymmetrisch onderdeel kan sneller worden gemonteerd dan een onderdeel met een nok die in een gleuf moet passen).

Bovendien moet de constructeur letten op de juiste volgorde van monteren en op de bereikbaarheid van de montageplaats. Dure bewerkingen tijdens de montage moeten worden vermeden.

Het aantal onderdelen wordt verminderd door het theoretisch minimale aantal onderdelen te bepalen. Dit doet de constructeur door zich de volgende drie vragen te stellen:

- beweegt het onderdeel ten opzichte van andere onderdelen zodanig dat de beweging niet kan worden opgevangen door plastische of elastische materiaaleigenschappen?
- moet het onderdeel van een ander materiaal zijn vervaardigd dan of geïsoleerd zijn van andere onderdelen?
- moet het onderdeel gescheiden zijn van andere onderdelen omdat anders montage of demontage onmogelijk wordt?

Het faaltempo gaat omlaag omdat het aantal relaties tussen onderdelen vermindert. Bij een groot aantal onderdelen verliest men al snel het overzicht. Op elk grensvlak doen zich problemen voor zoals contactcorrosie, tolerantieproblemen en montagefouten. Verder kunnen geschroefde verbindingen tijdens bedrijf lostrillen. De ontwerper kan bij een geringer aantal onderdelen meer aandacht aan elk onderdeel besteden.

Een nadeel van vermindering van het aantal onderdelen is dat de vervangingskosten hoger zijn. Met het oog op de onderhoudskosten is samenvoeging van de onderdelen uitsluitend verantwoord als het produkt van faaltempo en herstelkosten lager wordt.

Als echter de kosten gedurende de levenscyclus als uitgangspunt worden genomen, moet rekening worden gehouden met het feit dat samenvoeging van onderdelen de kostprijs verlaagt en de beheerskosten van reservedelen vermindert.

Samenvoeging van onderdelen is voor de consument altijd interessant als het apparaat is voorzien van onderdelen die eigenlijk nooit stuk gaan of als de kostprijs van het samengevoegde onderdeel nog steeds laag is ten opzichte van de totale kostprijs van het object. Onderdelen met een zeer ongelijk faaltempo moeten bij voorkeur niet worden samengevoegd, zeker niet als ze beide een aanzienlijk deel van de totale kostprijs uitmaken.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Toepassing van power integrated circuits (PIC's) kan leiden tot een lager faaltempo of een lagere kostprijs. PIC's zijn geïntegreerde schakelingen die in tegenstelling tot microprocessoren ook elementen bevatten die grote vermogens kunnen schakelen (in de orde van 10 kW) [59].

#### *C3 Verklein de reparatietijd*

Omdat bij 'design for assembly' ook wordt gelet op montagetijd en montagegemak, zal in veel gevallen ook het vervangen van een onderdeel minder tijd kosten en de reparatiekosten minder zijn. Aan de bereikbaarheid van componenten wordt steeds meer aandacht besteed.

### **Conclusies**

- De economische werkelijkheid dwingt fabrikanten tot een onderhoudsarm ontwerp. De herstelkosten zijn zo hoog ten opzichte van de aanschafprijs dat reparaties de gebruikskosten onevenredig verhogen. Ook de gevolgschade kan aanzienlijk zijn (wateroverlast, geen schone kleren).  
Daarnaast wordt aandacht besteed aan de reparatiebaarheid.

- Verlaging van het faaltempo wordt bereikt door over een breed front consequent alle storingen te analyseren en de gevolgtrekkingen te verwerken in het ontwerp. Kwaliteitsbeheersing van ontwerp, componentenproductie en assemblage is essentieel.
- Verlaging van het faaltempo wordt ook bereikt door het aantal onderdelen te verminderen.
- Ten opzichte van de auto haalt een wasmachine een relatief hoog aantal bedrijfsuren. Voor de auto ligt het aantal bedrijfsuren op  $9 \times 400 = 3600$  uur. Een wasmachine wordt beproefd op  $2500$  tot  $5000 \times 1,5$  uur =  $3750$  tot  $7500$  bedrijfsuren.
- Bij goedkope wasmachines treden aanzienlijke meerkosten op doordat het wasgoed harder slijt.

### 7.3 De gevolgen voor de onderhoudsdienst

Elektronica zal zodanig moeten zijn ontworpen dat storingsdetectie, diagnose en lokalisering voor een elektromechanisch monteur eenvoudig zijn. Probleemgevallen zoals intermitterende storingen zullen moeten worden behandeld door specialisten. De diagnose-apparaatuur moet nog verder worden verbeterd.

De hoeveelheid onderhoud zal niet veranderen door een beter ontwerp. Consequenties voor de werkgelegenheid door onderhoudsbewust ontwerpen zijn dus niet te verwachten.



## 8. Personenauto's

### 8.1 Inleiding

In de honderd jaar van zijn bestaan heeft de auto zich ontwikkeld van een hobby voor excentriekelingen tot een produkt van groot technisch raffinement. In de beginjaren eindigde nog menig ritje met een terugtocht getrokken door een paard. 'We mogen deze pioniers wel dankbaar zijn', merkt Alfred Sloan in *My years with General Motors* op, 'dat ze ons de kans hebben gegeven ons produkt te ontwikkelen'. Maar kennelijk was de aantrekkelijkheid van de vergrote bewegingsvrijheid zo groot dat men dit ongerief voor lief nam [68]. Het behoeft dan ook geen verbazing te wekken dat toen Henry Ford de prijs van de auto drastisch verminderde door produktie aan de lopende band, de auto zich zeer snel verbreidde. Rond de auto is dan ook een enorme industrie ontstaan. Volgens sommige schattingen verdient daaraan een op de zeven Europeanen direct of indirect zijn brood.

Door de grote overcapaciteit in de automobieliindustrie leefde een tijd lang de veronderstelling dat het aantal typen auto sterk zou teruglopen. Door de flexibele produktie-automatisering echter zijn de nadelen van kleine series enigszins verminderd. Om aan alle klantenwensen te voldoen, zal een grote verscheidenheid aan modellen blijven bestaan of zelfs worden uitgebreid.

In Nederland kost de auto gemiddeld rond 10% van het gezinsbudget (inclusief niet-autobezitters) [74] en is daarmee de op twee na grootste kostenpost van de gezinnen. De direct met de personenauto verbonden werkgelegenheid omvat ca. 170.000 arbeidsplaatsen [71]. Ontwikkelingen met betrekking tot de auto kunnen dus relatief grote gevolgen hebben.

Momenteel bestaat het Nederlandse wagenpark uit ca. 5 miljoen auto's. Naar verwachting zal dit aantal nog verder zal toenemen tot circa 6 miljoen in 2000. Factoren die de omvang van het wagenpark beïnvloeden, zijn gezinsverdunding, koopkrachtontwikkeling, toename van deeltijdarbeid en ontwikkelingen in de telecommunicatie die de verplaatsingsbehoefte kunnen beïnvloeden [72].

In tegenstelling tot de definitie van onderhoud in hoofdstuk 1 spreekt men in de automobieliindustrie over onderhoud en reparaties. Met onderhoud bedoelt men het toestandafhankelijke en gebruikafhankelijke onderhoud: de periodieke inspectiebeurt en het geplande onderhoud, waaronder de vervanging van slijtgedelen. Bij het

verhelpen van storingen spreekt men van reparaties. Een aanzienlijk deel van de reparatiekosten wordt gevormd door het schadeherstel ten gevolge van aanrijdingen.

Sinds de jaren vijftig zijn bij de auto grote verbeteringen verwezenlijkt op het gebied van betrouwbaarheid en onderhoudsbehoefte. Er is gestreefd naar een onderhoudsarm ontwerp. Koumans illustreerde dat in zijn uittreerede door de autorijder ten tonele te voeren die in 1949 naar Portugal wilde [64]. Deze automobilist moest, als hij de voorschriften van de fabrikant volgde, in Parijs en Bordeaux zijn auto laten doorsmeren, waarbij 12 tot 20 smeernippels vol vet werden gepompt en de motorolie werd bijgevoerd. In Madrid moest de auto naar de garage voor een grote beurt, waarbij bougies, contactpunten en remmen bijgesteld of vervangen moesten worden, het luchtfilter gereinigd, olie verversd en er opnieuw moest worden doorgesmeerd. Als de motor 80.000 km haalde zonder motorrevisie, mocht de eigenaar niet ontevreden zijn.

Het aantal uren reparatie en onderhoud dat een auto gemiddeld per jaar nodig heeft, is sindsdien gedaald van 25 naar 5 uur per jaar. De verwachting is dat deze ontwikkeling zich verder zal voortzetten. Deze verbeteringen zijn bereikt omdat de fabrikanten hebben ingespeeld op de wensen en het aankoopgedrag van de consument. Het concurrentiemotief heeft deze verbeteringen dus bewerkstelligd.

De werkelijk bereikte levensduur is in dezelfde periode opmerkelijk constant gebleven. Deze schommelt sinds 1930 rond de tien jaar [65]. In Nederland bedraagt het gemiddelde van de werkelijk bereikte levensduur voor auto's uit de bouwjaren 1970 t/m 1984 negen jaar [75]. Dit is inclusief auto's die uit de roulatie verdwenen door aanrijdingen. Gemiddeld rijdt een auto-eigenaar drie jaar in dezelfde auto. Gedurende de gemiddelde levensduur van negen jaar heeft een auto dus drie eigenaren gehad.

De beschikbaarheid van de gemiddelde auto bedraagt 99,8% op 8760 uur per jaar. Delen we het aantal uren dat de auto niet beschikbaar is op het aantal uren dat de auto echt wordt gebruikt (400 uur), dan is de beschikbaarheid 95% (zie tabel 8.1 en 8.2). Volgens de ANWB komt gemiddeld 10% van de auto's één of meerdere keren per jaar langs de weg stil te staan.

Tabel 8.1 Gegevens over personenauto's in Nederland

Aantal personenauto's (1985)	4,8 miljoen	[75]
Gemiddelde aanschafprijs	f 23.000,-	[72]
Gemiddelde onderhoudskosten over de eerste vijf jaar, prijsklasse f 20.000 - f 25.000	f 550,-	[69]
Loonkosten schadeherstelbedrijf	f 800 miljoen	
Gemiddelde kilometrage	15.600 km	[72]

Tabel 8.2 Berekende gegevens over personenauto's

Gemiddelde onderhouds- en reparatietijd (loonaandeel 50% en f 65,- uurloon)	6 uur
Aantal uren niet beschikbaar (2,5 x onderhouds- en reparatietijd)	15 uur
Gemiddeld aantal bedrijfsuren	400 uur
Gemiddelde onderhoudskosten als percentage van de aanschafprijs (excl. noodhulp ANWB en door eigenaar verricht onderhoud)	2,5%

De automobiellindustrie is momenteel een innovatieve bedrijfstak. Van een vrijwel geheel mechanisch produkt is de auto zich aan het ontwikkelen tot een voertuig met veel elektronica aan boord. Innovaties worden veroorzaakt door nieuwe technische vindingen, competitie tussen fabrikanten en ingrijpende veranderingen in de gebruiksomgeving zoals de energieprijzen of milieueisen [62].

Door de milieueisen gedwongen, gingen de autofabrikanten de bereiding van het benzine-luchtmengsel besturen met een microprocessor. Dit maakt naast de verbeterde beheersing van het verbrandingsproces ook de opslag en signalering van een aantal onderhoudsgegevens mogelijk.

## 8.2 Onderhoud

Een autofabrikant die een nieuw model op de markt brengt, bouwt voort op zijn ervaring met voorgaande modellen. In een nieuw model zullen geen ingrijpende veranderingen zijn aangebracht dan nadat deze uitgebreid zijn beproefd (wat overigens geen garantie is dat er geen problemen zullen optreden).

Storingen worden verdeeld naar de aard van de gevolgen:

- storingen waarbij de auto niet meer kan rijden;
- storingen waarbij de auto nog wel kan rijden, maar die onmiddellijk moeten worden verholpen;
- storingen die bij de eerstvolgende beurt moeten worden verholpen.

De auto-ontwerper die de behoefte aan onderhoud en reparatie wil verminderen moet gedetailleerde kennis hebben van de oorzaken van onderhoud en storingen. Deze kennis ontleent hij behalve aan zijn ervaring aan prototypebeproevingen, aan terugmeldingen uit de garantieperiode en aan een gedurende vijf jaar volgen van een geselecteerd wagenpark. De ontwerper van een auto bestaat niet. Aan de totstandkoming van een nieuw ontwerp werken vele mensen mee die zich met de diverse componenten bezighouden, zowel intern als

bij toeleveranciers. Wel is er meestal een afdeling ontwerp compleet voertuig.

De ontwerper heeft door zijn ervaring een vrij nauwkeurig inzicht in de oorzaken en de kwantiteit van het gebruiksafhankelijk onderhoud. Bij storingen is het inzicht in de oorzaken minder groot, getuige het feit dat verschillende autotypen verschillende storingsbronnen hebben.

De auto kan opgedeeld worden in de volgende systemen:

Het voertuiggedeelte:

- het remsysteem
- de stuurinrichting (inc. wielophanging)
- de carrosserie
- het interieur
- het elektrisch systeem (incl. verwarming).

De aandrijflijn:

- de motor
- de transmissie.

Het toegestane aantal storingen is per systeem in het pakket van eisen vastgelegd. Verder geldt voor het complete voertuig een norm voor het faaltempo. Ter vermindering van reparatie en onderhoud worden twee invalshoeken gehanteerd, namelijk een gerichte inspanning om het aantal storingen te verlagen en een gerichte inspanning om de intervallen tussen de onderhoudsbeurten te vergroten en de omvang van de beurten te verkleinen.

Dit betekent onder andere dat de technische levensduur van sommige slijtagedelen moet worden verlengd. Een ander belangrijk aandachtspunt is de vermindering van het onderhoud voor corrosiepreventie. Een aantal fabrikanten streeft naar verlenging van de werkelijk bereikte levensduur. Momenteel bepaalt meestal de corrosie van de carrosserie het moment waarop de auto wordt afgedankt. Ook bij het streven naar levensduurverlenging wordt dus veel aandacht besteed aan het vermijden van corrosie.

De ontwerper maakt bij dit alles gebruik van nieuwe mogelijkheden die door de researchafdeling of door toeleveranciers zijn ontwikkeld alsmede van constructieve aanpassingen op grond van gebruikservaring.

Doorgaans gaat de ontwerper bij het zoeken naar mogelijkheden onderhoud en reparaties te verminderen intuïtief te werk. Afbeelding 1.3 kan worden gebruikt om op methodische wijze na te gaan of er mogelijkheden zijn blijven liggen. De regels van afbeelding 1.3 fungeren als opstapje naar concrete oplossingen. In 8.3 wordt per systeem nagegaan welke verbeteringen op onderhoudsgebied recent zijn gerealiseerd en welke de komende tien jaar vermoedelijk zullen plaatsvinden. Aangezien er geen getallen aan ten grondslag liggen,

berusten de conclusies op de mening van deskundigen uit de branche. De in 8.3 genoemde zaken zijn voorbeelden. Er is niet gestreefd naar volledigheid.

### 8.3 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst

#### Het remsysteem

Het remsysteem bevat een aantal slijtagedelen, zoals de remblokken, resp. -schoenen, waarvan de technische levensduur gemiddeld op 40.000, resp. 60.000 km ligt. De levensduur is sterk afhankelijk van de rijstijl. Voorts moet de remvloeistof gemiddeld eens per twee jaar worden vervangen.

##### *A1 Verlaag de belasting*

Vergroting van de diameter van de remschijven en vergroting van het werkzame oppervlak van de blokken wordt toegepast om de technische levensduur te verlengen.

##### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

De toepassing van geweven en gesinterde materialen maakt het mogelijk de levensduur van remblokken te verlengen.

##### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Door toepassing van rembekrachtiging en antiblokkeersystemen is het aantal onderdelen de laatste jaren vergroot. De vermindering van het aantal onderdelen door toepassing van de zwevende remklauw weegt daar niet tegen op.

##### *B3 Breng een sensor aan*

In sommige automerken krijgt de bestuurder een signaal als de remblokken moeten worden vervangen.

Ook het antiblokkeersysteem meldt aan de bestuurder als het defect is. Door het kookpunt van de remvloeistof te meten, kan men in de werkplaats bepalen of de remvloeistof moet worden vernieuwd omdat deze teveel water bevat.

##### *D5 Pas compartimentering toe*

Een voorbeeld is het 'fail-safe' uitvoeren van antiblokkeersystemen. Bij een defect gaat het systeem naar een veilige toestand.

Bij een defect in de elektronica geeft deze een vast uitgangssignaal, zodat in elk geval een garage kan worden bereikt. In de automobielwereld duidt men dit aan met 'limp home mode'.

*Conclusie*

Signalering aan de bestuurder wanneer de remblokken moeten worden vervangen stelt de ontwerper voor het traditionele dilemma van toestandsbewaking: enerzijds worden kosten uitgespaard doordat de levensduur van de remblokken volledig wordt benut. Anderzijds worden met de signalering een extra kostenpost en een storingsbron geïntroduceerd. De conclusie is dat een dergelijke signalering leidt tot een betere beheersing van het onderhoud (het remmen met blokken zonder voering wordt vermeden) en niet tot kostenverlaging. Rembekrachtiging en antiblokkeersystemen verhogen in principe het faaltempo.

**De stuurinrichting (incl. wielophanging)***A5 Verminder het aantal onderdelen*

Het tegendeel is waar. Als adaptieve vering gemeengoed wordt, wordt een nieuwe storingsbron geïntroduceerd. Het systeem wordt onder andere gevoeliger voor kleine aanrijdingen.

*D5 Pas compartimentering toe*

Een voorbeeld van deze strategie is het gedurig zoeken naar banden die het mogelijk maken met een lekke band nog een bepaalde afstand te rijden, zodat de automobilist een garage kan opzoeken.

*Conclusie*

Daling van de onderhouds- en reparatiebehoefte is niet te verwachten.

**De carrosserie***A1 Verlaag de belasting*

Vermoeiingsverschijnselen bij de personenauto leiden in het algemeen niet tot storingen. Corrosie echter wel. Wegenzout wordt algemeen gezien als de voornaamste oorzaak van corrosie bij de carrosserie. Daarom is beperking van de hoeveelheid strooizout een van de middelen om corrosie tegen te gaan. Rijkswaterstaat heeft met nat zout de effectiviteit van het strooien aanzienlijk weten op te voeren. Door het zout in vochtige toestand over de weg uit te spreiden, waait het minder weg en hecht het zich beter aan de sneeuw- of ijslaag. Vermindering van de kans op corrosie is verder te verwachten door een beter begrip van het ontstaan van corrosie en de beproevingsmethoden die daaruit voortvloeien. Bij hoge snelheid in nat weer werpen de banden kleine druppeltjes met vuil omhoog. De grootte van deze druppeltjes en de plaats waar deze terechtkomen, is sterk afhankelijk van snelheid, verkeersintensiteit en windrichting. Vandaar dat wind-

tunnelproeven bij een vaste snelheid niet toereikend zijn om het juiste patroon van vuilopeenhoping vast te stellen. Beproeving geschiedt daarom in stof tunnels. De druppeltjes worden, vermengd met vuil, door openingen in de kokerbalken van de carrosserie gezogen. De toegang wordt gevormd door gaten in de profielen en door gaten die nodig zijn om elektroforese en andere oppervlaktebehandelingen van de carrosseriedelen mogelijk te maken.

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Het ideaal van elke ontwerper is dat zijn ontwerp in de praktijk een bepaalde periode ongestoord functioneert en dat daarna alle componenten gelijktijdig bezwijken. Aangezien auto's sterk verschillende afstanden per jaar rijden, is dit vrijwel niet te realiseren. Aangezien de economische levensduur van de aandrijflijn meestal groter is dan de levensduur van de carrosserie, is de staat van de carrosserie bepalend voor de werkelijk bereikte levensduur van de hele auto. Slechts in zeer weinig gevallen (jaarkilometrage 50.000-100.000 km) wordt de levensduur bepaald door mechanische slijtage, maar dan is, als de rest van het voertuig nog in goede conditie is, revisie wellicht zinnig en betaalbaar.

Duidelijk wordt dat het voorkomen van corrosie van de carrosserie een noodzakelijke voorwaarde is voor levensduurverlenging en vermindering van onderhoud en – daardoor – voor vermindering van de exploitatiekosten van het voertuig. Vooral de fabrikanten die in hun voertuigen robuuste, sterke motoren en aandrijvingen toepassen met een lange levensduur, streven naar verbeterde bescherming van de carrosserie.

De kwaliteit van de bescherming van de carrosserie bepaalt elke fabrikant voor zichzelf. Hij legt die vast in normen en beveiligingen. Het voertuig moet zijn rol zo lang en zo goedkoop mogelijk vervullen onder omstandigheden van 10.000 tot 100.000 km/jaar, op gepekelde wegen, op gravelwegen, met hoge snelheid, in de bergen, in zeeklimaat, in poolklimaat en bij grote verschillen in onderhoudsgedrag van de gebruiker. Zink kan dan als corrosiewerend middel een belangrijke rol gaan vervullen en doet dit voor een deel al.

Zink biedt als oppervlaktebehandeling op staal een kathodische bescherming. Ook bewerkingen na het aanbrengen van de zinklaag en kleine beschadigingen in het zinkoppervlak worden door het zink uit de omgeving alsnog beschermd.

Een zinklaag zonder verdere bescherming verliest in een agressieve omgeving circa 3 micrometer per jaar. De carrosseriebescherming kan dus afhankelijk van de zinklaagdikte worden gegarandeerd.

Toepassing van hoogwaardige corrosievaste staalsoorten (chrom-nikkel legeringen) of aluminium is zeer duur. Ook versterkte kunststoffen bieden veel mogelijkheden, maar leiden tot nieuwe construc-

ties en ontwerpen. Toepassing op enige schaal zal minstens tien jaar op zich laten wachten.

In het kader van redelijke kosten en met de huidige of nabije auto-ontwerpen en -technieken biedt zink de beste mogelijkheden voor bescherming tegen corrosie.

Verzinken voorkomt cosmetische (rode) roest gedurende drie à vier jaar na beschadiging van het oppervlak (steenslag, krassen). Het doorroesten van het voertuig wordt vertraagd, reparaties en verplichte inspecties worden minder vaak nodig.

Verzinken veroorzaakt extra problemen bij het lassen, doch deze problemen lijken goeddeels overwonnen. Een apart probleem vormt het herstellen van blikshade.

Herstel van schade wordt gecompliceerder. De kans is groot dat daarbij de zinklaag niet juist wordt hersteld. De auto begint op die plaats dan aan zijn oude levensduurpatroon zonder zinklaag. Personeel zal moeten worden beschermd tegen zinkdamp bij laswerkzaamheden.

Fabrikanten hebben lokaal ook andere materialen toegepast, zoals kunststofvoeringen in wielkasten. Ook andere produktietechnieken, zoals lijmen in plaats van puntlassen, verminderen de kans op het ontstaan van corrosie.

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Veel carrosseriedelen worden in kunststof uitgevoerd en geïntegreerd, zoals verlichtingsarmaturen en instrumentenpanelen. Dit leidt bij de fabrikant tot eenvoudiger routing van de materiaalstroom, eenvoudiger montage en dus tot verlaging van de fabricagekosten. De kosten van schadeherstel worden echter nadelig beïnvloed.

#### *B3 Breng een sensor aan*

Beheersing van corrosie zal blijven geschieden door visuele inspectie. Sensoren zijn hiervoor niet praktisch toepasbaar.

#### *Conclusie*

Met een laagdikte van 10-12 micrometer zink en een opofferingsnelheid van 3 micrometer per jaar op beschadigde plaatsen, kan verzinken het corrosieproces minstens drie à vier jaar vertragen. Het is niet onaannemelijk dat daarmee ook de werkelijke levensduur van de auto met drie jaar wordt verlengd. Bij een vrijwel gelijkblijvende aanschafprijs zou dit tot een lagere afschrijving moeten leiden, tenzij er ten gevolge van de levensduurverlenging een verzadiging van de tweedehandsmarkt optreedt. Vermindering van de corrosiebelasting door natstroom van zout leidt eveneens tot een verlenging van de levensduur. De kosten van schadeherstel zullen door de gecompliceerdere reparatietechnieken en geïntegreerde onderdelen toenemen.



Het hergebruik van verzinkt plaatstaal is gecompliceerder dan van gewoon plaatstaal.

### Het interieur

#### *A2 Vergroot de belastbaarheid*

Bij verlenging van de levensduur van de auto moet extra aandacht worden besteed aan de slijtvastheid van de bekleding. Het opnieuw bekleden van stoelen is relatief duur en zal vermoedelijk nauwelijks plaatsvinden.

### Het elektrisch systeem

#### *A5 Verminder het aantal onderdelen*

Toepassing van een ringleiding, eventueel in glasvezelkabel uitgevoerd, in plaats van de huidige kabelbundels zou het aantal kabels in de auto sterk reduceren. Daar staat tegenover dat de bedieningsknop en het schakelement worden gescheiden. Het effect op de betrouwbaarheid is nog moeilijk te beoordelen.

Verder streeft men naar vermindering van het aantal stekers.

#### *A6 Elimineer een faaloorzaak*

Met de introductie van de elektronische ontsteking is een bron van gebruiksfafhankelijk onderhoud en van storingen geëlimineerd. Ook het gemiddeld brandstofverbruik wordt gunstig beïnvloed.

Er wordt gestreefd naar verbetering van stekers en contactdozen, aangezien die een belangrijke bron van storingen zijn.

#### *Conclusie:*

Ten gevolge van de introductie van de elektronische ontsteking en verbetering en vermindering van het aantal contacten is een verlaging van de onderhouds- en reparatiekosten te verwachten.

### De motor

#### *A Verlaag het faaltempo*

Omdat de levensduur van motoren momenteel langer is dan die van de carrosserie zullen verbeteringen in het motorontwerp vooral worden benut om het brandstofverbruik en het gewicht te reduceren en niet om de levensduur te verlengen. De ontwikkeling van de keramische motor zou theoretisch kunnen bijdragen tot verlaging van het faaltempo, omdat de ventilator en de radiator vervallen. Er is dan echter wel een apart verwarmingssysteem nodig. Over het effect voor onderhoud en reparatie valt echter op dit moment nog niets concreets te zeggen.

*A1 Verlaag de belasting*

De door een microprocessor gestuurde verbranding vormt een beveiliging tegen overbelasting en kan derhalve het faaltempo verminderen. Ook gaat de levensduur van bougies erdoor omhoog. De betere beheersing van het verbrandingsproces zal ook een gunstige invloed hebben op de standtijd van de carterolie en op het brandstofverbruik.

*A3 Verklein de spreiding in de belasting*

Door toepassing van geavanceerde rekentechnieken worden onderdelen met een lokaal hoge belasting en daarmee voortijdige uitval vermeden. Hetzelfde geldt voor overbelasting in overgangssituaties zoals tijdens het opwarmen van de motor. Dit effect wordt echter tegengewerkt doordat het gebruik van auto's gedifferentieerder wordt.

*A5 Verminder het aantal onderdelen*

Dit gebeurt wel binnen de motor zelf. De twaalf en zestien kleppen techniek werkt echter in tegengestelde richting. Ook de introductie van de door een microprocessor geregelde mengverhouding betekent een vermeerdering van het aantal onderdelen.

*A6 Elimineer een faaloorzaak*

Door de toepassing van zelfnastellende klepstoters kan het onderhoud tijdens de 10.000 km beurt belangrijk worden verminderd. Zelfnastellende kleppen verbeteren bovendien het energierendement van de auto.

*B3 Breng een sensor aan*

De microprocessor maakt bijvoorbeeld signalering van de conditie en het niveau van de carterolie mogelijk. Hierdoor zal de standtijd van de olie kunnen worden verlengd. De termijnen van olieverversing zijn namelijk afgestemd op ongunstig gebruik van de auto.

*D5 Pas compartimentering toe*

Ook de motorelektronica kent een 'limp home mode'. De toepassing van katalysatoren heeft negatieve gevolgen. Bij een defecte bougie moet veelal de katalysator worden vervangen. Bij elektronische ontsteking kan met een pingelsensor het ontstekingsstijdstip worden gecorrigeerd. Zuigerschade wordt hiermee voorkomen.

*Conclusie*

Geavanceerde rekentechnieken zullen leiden tot een lager aantal storingen dan voorheen. Het effect van de door een microprocessor geregelde verbranding is nog niet te overzien.

## De transmissie

### *A3 Verklein de spreiding in de belasting*

Ook hier geldt dat geavanceerde rekentechnieken lokale overbelastingen in onderdelen doen verminderen, waardoor minder onderdelen voortijdig uitvallen.

### *A5 Elimineer een faaloorzaak*

De toepassing van een zelfnastellende koppeling leverde een verlaging van de onderhoudskosten op. Over het effect van de elektronisch geregelde versnellingsbak kan nog weinig worden gezegd. Een daling van het aantal storingen is ook opgetreden door de verbeterde afwerking van het oppervlak van tandwielen en assen.

### *Conclusie*

Er treedt een vermindering van de onderhoudsbehoefte op.

## 8.4 Gevolgen voor de consument

De geschetste ontwikkelingen maken het in de toekomst mogelijk het periodieke garagebezoek te verminderen tot eens per 20.000 à 50.000 km, afhankelijk van de jaarlijkse kilometrage. De vraag is of de dealers dit gewenst achten en welke druk zij op de fabrikant kunnen uitoefenen om dit tegen te gaan. De wijze waarop de signalering van conditiebewakingssystemen zal worden uitgevoerd, is hiervoor sterk bepalend.

Omdat het steeds langer duurt voordat slijtage aan onderdelen een rol speelt, blijven de op willekeurige tijdstippen optredende storingen over. Het aantal zal de kwaliteit van de auto bepalen. Regelmatig garagebezoek zal het aantal storingen nauwelijks verminderen. De vraag is hoe lang het duurt voor de automobilist dit constateert en signalering van storingen zal eisen. Naarmate de auto betrouwbaarder wordt, worden menselijke fouten, zoals zonder benzine staan, relatief belangrijker. Dit zal een bodem leggen in het minimaal te bereiken aantal storingen.

Indien de tendens over te gaan op verzinkt staal voor de carrosserie algemeen doorzet, is te verwachten dat de werkelijk bereikte levensduur van de auto naar vijftien jaar gaat. De mogelijkheid is wel geopperd van een nog langere ontwerplevensduur, waarbij de auto na vijftien jaar zou worden gerenoveerd [73]. Dit gebeurt op dit moment al bij treinstellen en vliegtuigen. Het verschil in doelmatigheid tussen nieuwbouw en onderhoud is echter van dien aard dat hieruit een kostennadeel ontstaat voor de consument. Indien de levensduur inderdaad naar vijftien jaar gaat, moet de levensduur van randappara-

tuur zoals benzinemeters worden verbeterd. Hetzelfde geldt voor de bekleding van de stoelen.

De levering van reservedelen en de beschikbaarheid van afstelvoorschriften zullen bij deze verlengde levensduur een toenemend probleem vormen.

De consument zal vooral de verhoogde betrouwbaarheid bespeuren. Het prijsvoordeel van minder onderhoud zal vermoedelijk teniet worden gedaan door de verhoogde kosten van schadeherstel en de hogere aanschafprijs. De langere levensduur zal vooral het doe-het-zelven in omvang doen toenemen. De laatste eigenaar heeft geen geld om het onderhoud te laten verrichten door een garagebedrijf.

### **8.5 Gevolgen voor de met de auto verbonden bedrijvigheid**

De hoeveelheid gebruiksfhankelijk onderhoud zal de komende tien jaar teruglopen, vermoedelijk met de helft. Dit heeft meetbare gevolgen voor de werkgelegenheid. Wat betreft de aard van het onderhoud zal het gebruiksfhankelijke onderhoud sterk afnemen tot het enige malen simpel verwisselen van een aantal componenten. Er treedt een verschuiving op van gebruiksfhankelijk naar toestandsafhankelijk onderhoud.

Middenniveau-reparaties zoals koppelingen, remcilinders, synchronisaties zullen door verbeterde materialen en betere kwaliteitscontrole tijdens fabricage en montage afnemen. Dit leidt tot vermindering van het middenniveau-personeel. Lager geschoold personeel verricht het simpele onderhoud en het opknappen van inruilauto's. De werkplaatschef zal echter moeten worden bijgeschoold op het gebied van systeemdenken (storingsdiagnose en lokalisatie) en elektronica.

Voor zeer zeldzame storingen in de elektronica zal worden teruggevalen op de importeur/fabrikant. Deze ontwikkeling is in de vliegtuigbouw al te bespeuren. Voor een garage is het in dienst houden van een technicus met specialistische kennis dan te duur. Toepassing van een ringleiding met digitale signaalverwerking zal deze ontwikkeling verder versterken. Deze verandering in de aard van het onderhoud (storingen zijn minder goed of niet zintuiglijk waar te nemen, te analyseren en te lokaliseren), zal aanpassing van het beroepsonderwijs nodig maken.

Het schadeherstel na aanrijdingen zal door de verzinkte carrosserie gecompliceerder en duurder worden. De schadeherstelbedrijven zullen belangrijker worden ten opzichte van de bedrijven die zich bezig houden met periodiek onderhoud.

Er zullen gespecialiseerde bedrijven ontstaan die micro-elektronica

kunnen naleveren, nadat de grote chipfabrikanten de levering hebben gestaakt. Naarmate de levensduur langer wordt, zal dit effect sterker worden.

Voor de Nederlandse economie betekent een langere levensduur van de auto een verhoging van het bruto nationaal produkt omdat bij eenzelfde import een grotere vervoersprestatie wordt geleverd. Dit effect wordt enigszins tegengegaan door een verhoogde import van reservedelen.

---

## Gebruikte termen en hun betekenis

### *Bedrijfszekerheid of betrouwbaarheid*

De kans dat een systeem een bepaalde tijd zonder storingen functioneert indien het onder gedefinieerde omstandigheden wordt gebruikt.

### *Beschikbaarheid*

De fractie of het percentage van de tijd, gemeten over een bepaalde tijdsperiode, dat het object niet ten behoeve van onderhoud aan het gebruik was onttrokken. In de betrouwbaarheidsanalyse geldt als definitie: de kans dat een object op een willekeurig moment bedrijfs gereed is.

### *Correctief onderhoud*

Onderhoud dat men pleegt nadat een storing is opgetreden (in tegenstelling tot preventief onderhoud).

### *Economische levensduur*

De economische levensduur loopt ten einde als de onderhoudskosten zo hoog worden dat aanschaf van een nieuw, doch identiek object voordeliger is (gebouwen, bij vliegtuigen: 'economic repair life'). Bij produktiemiddelen loopt de economische levensduur ten einde als de aanschaf van een nieuw, eventueel geavanceerder produktiemiddel er toe leidt dat dezelfde produkten tegen een lagere kostprijs kunnen worden voortgebracht.

### *Faaltempo of storingsgraad*

Het aantal storingen per tijdseenheid dat optreedt bij een object dat een bepaalde leeftijd heeft bereikt in het direct op deze leeftijd volgende tijdsinterval.

Als het faaltempo constant is, is het de inverse van het gemiddelde storingsinterval (Mean Time Between Failure).

### *Gebruiksafhankelijk onderhoud (G.A.O)*

Onderhoud dat men pleegt nadat een bepaalde hoeveelheid tijd, draaiuren of kilometers is verstreken (in tegenstelling tot toestandsafhankelijk en storingsafhankelijk onderhoud).

*Gebruikskosten*

De kosten per jaar verbonden aan het gebruik van een object. Gebruikskosten bestaan meestal uit de volgende componenten: rente en afschrijving, energiekosten, onderhoudskosten, bedieningskosten en overige kosten.

*Gebruiksperiode*

De periode dat een object wordt gebruikt door één eigenaar dan wel zonder dat het object grondig wordt aangepast.

*Gemiddelde storingsinterval (Mean Time Between Failure)*

Het gemiddelde van de over een representatieve periode opgetreden storingsintervallen.

*Onderhoud*

Onderhoud is het in stand houden van het bestaande ontwerp.

*Onderhoudbaarheid*

De kans dat onderhoud van een object, dat onder gedefinieerde omstandigheden wordt onderhouden, niet langer dan een bepaalde tijd zal duren.

*Onderhoudsarm ontwerpen*

Streven naar een zo hoog mogelijke bedrijfszekerheid en preventievrijheid.

*Onderhoudsbehoefte*

Het totaal van onderhoudstaken voortvloeiend uit storingen en het noodzakelijke preventieve onderhoud.

*Onderhoudsbewust ontwerpen*

Bij het ontwerp rekening houden met het onderhoudsaspect zodat dit wordt afgewogen tegen de overige gebruikaspecten en gangbare economische regels.

*Onderhoudskosten*

Kosten benodigd voor de instandhouding van een object. In deze publikatie is daarin tevens de gevolgschade begrepen.

*Onderhoudsvriendelijk ontwerpen*

Streven naar een hoge onderhoudbaarheid.

*Ontwerplevensduur*

De levensduur waar de ontwerper van uitgaat. Het object moet gedurende deze periode kunnen blijven functioneren tegen aanvaardbare onderhoudskosten.

*Preventief onderhoud*

Onderhoud dat men pleegt voordat een storing is opgetreden (in tegenstelling tot correctief onderhoud).

*Reparatie*

Het technisch proces waardoor correctief onderhoud wordt gerealiseerd.

*Storingsafhankelijk onderhoud*

Onderhoud nodig om storingen op te heffen (in tegenstelling tot gebruiksafhankelijk en toestandsafhankelijk onderhoud).

*Storingskans of faalkans*

De kans dat een systeem in een bepaalde periode een storing zal vertonen indien het onder gedefinieerde omstandigheden wordt gebruikt.

*Technische levensduur*

Het tijdsbestek waarbinnen het object zijn technische functies naar behoren vervult.

*Terotechnologie*

Een combinatie van management, financiële en ingenieursmethoden teneinde voor een systeem economisch verantwoorde kosten tijdens de gebruiksduur te bereiken (van het Griekse *tereo* = bewaken).

*Toestandsafhankelijk onderhoud (T.A.O.)*

Een voorgeschreven inspectie tijdens welke de toestand wordt vergeleken met een norm. Indien niet aan de norm wordt voldaan, volgt onderhoud om de gewenste toestand te verkrijgen. Indien wel aan de norm wordt voldaan, is daarmee het onderhoud afgesloten (gerelateerde begrippen zijn gebruiksafhankelijk en storingsafhankelijk onderhoud).

*Werkelijk bereikte levensduur*

De levensduur die volgt uit statistieken over aanschaf en afdanken van objecten.



---

## Organisatie van de studie

Bij het bepalen van het onderwerp van de studie is een adviesgroep gevormd. Voor het opzetten en uitwerken van het kader van deze studie is een stuurgroep samengesteld. Deze stuurgroep, samengesteld uit personen uit verschillende disciplines, heeft de projectleider bijgestaan bij de opbouw van de studie en het bemannen van de werkgroepen.

De adviesgroep was als volgt samengesteld:

- ir. M.A.M. Hurks  
Océ Nederland
- ir. H.K.J. Melessen  
Bureau Berenschot
- prof.dr.ir. A.L. van der Mooren  
TU Eindhoven

De stuurgroep was als volgt samengesteld:

- ir. G.J.J. den Boer  
Hoogovens Groep †
- A.H.P. de Kanter  
Fokker
- prof.ir. D.G.H. Latzko  
TU Delft
- prof.dr.ir. A.L. van der Mooren  
TU Eindhoven
- dr.ir. J. Muntendam  
Philips International
- prof.ir. H.J.Th. Span  
TU Delft/KWS
- J.C.A. Vercoulen  
Océ Nederland
- ir. H. Vroman  
Ministerie van Defensie

Er zijn zeven werkgroepen gevormd, die ieder in hun vakgebied hebben gekeken naar mogelijkheden met nieuwe technieken te komen tot een onderhoudsbewust ontwerp.

*Werkgroep Wegenbouw*

- ir. A.P. van den Ban  
Gemeentewerken Rotterdam
- ir.dr.s. J.H. Geerts  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde, RWS
- ir. P. de Kiewit  
Studiecentrum Verkeerstechniek
- ir. P.C. Koning  
Grontmij
- ir. P. Lubking  
Laboratorium voor Grondmechanica
- ir. T. Woestenburg  
Provinciale Waterstaat, Groningen

*Werkgroep Bouw*

- C.W. Blom  
Bureau Blom
- ir. H.S. Buitenkamp  
TNO-IBBC
- ir. W. Burgler  
Servica technisch beheer
- ing. A.A.J. Damen  
Bouwcentrum
- drs. W. Lieber  
Woningvereniging Nijmegen
- ir. L. Vuyk  
Architectenbureau Mertens & Vuyk
- ing. L.A. van Rij  
Woningbouwvereniging SAVO

*Werkgroep Procesindustrie*

- ing. F. Arav  
Stork Ketels
- ir. N.J. van Bommel  
TNO/IWECO
- ir. L.B. Dufour  
Kema
- ir. J.W. Klomp  
Shell
- ing. W.P. Moerman  
DSM
- ir. O. Ongkiehong  
Hoogovens Groep
- ir. H. Toersen  
TU Eindhoven

*Werkgroep Vliegtuigbouw*

- ir. A.A. Jongebreur  
Fokker  
ir. C. Klaver  
Fokker  
ir. S. Opdam  
Fokker  
ir. H. Schoevers  
KLM  
dr. R.J.H. Wanhill  
NLR

*Werkgroep Kantoorautomatisering*

- ir. A.G.E. Gelderblom  
Océ Nederland  
ir. H.G.J.M. Kockelmans  
Océ Nederland  
P.P.J. Leerentveld  
Philips TDS  
C.J. Schrama  
IBM  
M.T.A.M. Vijftigschild  
Rijkskantooromachinecentrale  
H.J.R. van der Werff  
Rabobank

*Werkgroep Wasmachines*

- drs. G. Antonides  
EU Rotterdam  
R. Boogaard  
Miele Nederland  
J.W. Gaillard  
IVHA  
ir. H.K.A. de Lange  
Philips  
P.M.J. Terpstra  
TNO-Instituut voor Reinigingstechniek

*Werkgroep Personenauto's*

- ir. F.A.V.M. Christophe  
Volvo Car  
L.A.J.D. van den Dool  
Pon's Automobielhandel  
ir.drs. P.D. van der Koogh  
TNO

M.J. Lemckert  
ANWB  
ir. H.T.M. van Lipzig  
DAF Trucks  
D. Schmidt  
PCBB

Aan de tekst droegen daarnaast onder andere bij:

ir. E.J. Bussemaker  
Stork Pompen  
ir. R.W. van Otterloo  
Kema  
prof.ir. K. Smit  
KMA/TU Delft  
ing. P. Verhoeven  
TU Delft

Het project stond onder leiding van ir. G. Laurentius, project-ingenieur bij de Stichting Toekomstbeeld der Techniek. Agaath van der Kamp-Thomasson verleende medewerking bij de organisatie van de studie en het verwerken van de tekst.

De Stichting is zeer veel dank verschuldigd aan allen die belangeloos een aanzienlijke hoeveelheid tijd en energie aan dit project hebben gewijd.

---

# Literatuur

## Hoofdstuk 1

### Onderhoud algemeen:

- [1] BLANCHARD, B.S., LOWERY, E.E., *Maintainability*, Mc Graw Hill, 1969
- [2] MILES, L.D., *Waarde analyse*, Het Spectrum, 1966
- [3] SMIT, K., *Onderhoud van intuïtie naar rationaliteit*, Kluwer, 1981
- [4] *Engineering Design Handbook, Maintainability Guide for Design*, NTIS, oktober 1972
- [5] *1984 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE, januari 1984

### Bedrijfszekerheid:

- [6] BAZOVSKY, I., *Reliability Theory and Practice*, Prentice Hall, 1961
- [7] O'CONNOR, P.D.T., *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, 1985
- [8] *Bedrijfszekerheid in de micro-elektronika*, TH-Delft, Afdeling der Elektrotechniek, 1980
- [9] *Special issue on reliability*, IEEE Spectrum, oktober 1981

### Onderhoudsbewust ontwerpen:

- [10] MOOREN, A.L. VAN DER, SMITH, P., *Onderhoudsbewust ontwerpen in de werktuigbouw*, Klimaatbeheersing nr. 10 en nr. 11, 1981
- [11] SMIT, K., *Onderhoudstechnologie*, collegedictaat KMA, 1977
- [12] *Onderhoud en ontwerp*, symposiumverslag NVDO, december 1970, uitgave NVDO, 's-Gravenhage, 1971

### Gebruikskosten:

- [13] *Afweging van gebruikskosten bij investeringen in gebouwen*, Stichting Bouw Research, publicatie nr. 103, 1984

### Levensduur:

- [14] PIETERS, J.H.M., KUIL, J.A. VAN DER *De optimale levensduur van producten*, De Ingenieur, nr. 15, 1977

- [15] WANHILL, R.J.H., *Material Selection and Structural Design for Safety and Durability*, Paper for the International Conference on Fracture Mechanics Technology, applied to Materials Evaluation and Structure Design, Melbourne, NLR MP 82023U, augustus 1982

### Hoofdstuk 2

- [16] COMMISSIE VERKEERS- EN VERVOERS ONDERZOEK (CVVO), *Eindrapport*, 1984
- [17] HEYDEN, J.H.A. VAN DER, LEEUWEN, H. VAN, *Machinaal bestraten met betonstraatstenen*, Voordracht gehouden op de Tweede Internationale Conferentie Betonstraatstenen te Delft, Gemeentewerken Rotterdam/ECT, 1984
- [18] MOLENAAR, A.A.A., *Structural performance and design of flexible road constructions and asphalt concrete overlap*, Dissertatie TH-Delft, 1983
- [19] WOESTENBURG, T., *Bestuurlijke en technische aspecten van rationeel wegbeheer op provinciaal niveau*, PATO, 1986
- [20] *America's Highways: accelerating the search for innovation*, Transportation Research Board/National Research Council, 1984, ISBN 0-309-03656-9
- [21] *Asfalt in weg- en waterbouw*, VBW, Breukelen, 1985
- [22] *Automatiseringsaspecten bij de opzet en het gebruik van het gegevensbestand voor wegen*, Werkgroep R1, SCW, Arnhem, oktober 1982
- [23] *Kosten van land- en waterwegen*, CBS, 1980
- [24] *Kosten van tijdverlies door files, deel I (woon-werk verkeer)*, Stichting Weg, juni 1982, en *deel II (vrachvervoer)*, december 1983
- [25] *Plattelandswegen in beton*, Enci-Cemy-Robur BV, 1980
- [26] *Rationeel wegbeheer*, mededeling 46, SCW, Arnhem, 1979
- [27] *Symposiumverslag van 'Het Nederlandse Wegencongres'*, 's-Gravenhage, 1984
- [28] *Symposiumverslag van 'Het Nederlandse Wegencongres'*, 's-Gravenhage, 1985
- [29] *Verwerkingsmethode Inspectieresultaten*, Tussenrapportage Werkgroep R1 (Rationeel Wegbeheer), SCW, Arnhem, juli 1982
- [30] *Visuele inspectie, schade catalogus*, SCW, Arnhem, 1982

### Hoofdstuk 3

- [31] VROMAN, H., *Systematische benadering van de levensloop van onroerend goed*, Beheer en Onderhoud, december 1982
- [32] *Kwalitatieve Woningregistratie deel II, Nederland totaal*, Ministerie VROM, 1986

- [33] *Onderhoudsbewust bouwen*, Progressbouw, Bodegraven, 1984
- [34] *Verkenningen op het terrein van onderhoudsbewust ontwerpen*, Stagg/NVDO, Amsterdam, maart 1986
- [35] *Volkshuisvestingsplan '86-'90*, Gemeente Rotterdam

#### Hoofdstuk 4

- [36] ALLIANZVERSICHERUNG AG, *Handbook of Loss Prevention*, Springer-Verlag, 1978
- [37] ARAV, F., *Het ontwerpen van op hoge druk en temperatuur belaste componenten*, Stork Ketels, november 1982
- [38] BEYERS, DUFOUR e.a., *Inspection, evaluation and repair of the flawed feedwater nozzle of the 50 MWe Dodewaard GKN boiling water reactor*, Kema Scientific & Technical Reports, 1984
- [39] HAMMONDS, PH., SLADE, M., *Maintenance - key issues and approaches for the future*, Maintenance News, december 1985
- [40] KNOCH, H., *Siliciumcarbide: goed slijtvast en corrosievast materiaal voor pomponderdelen*, I<sup>2</sup>-Procestechnologie, november 1985
- [41] *Symposiumverslag Betrouwbare en Veilige Procesapparatuur*, Niria/KIvI/KNCV, 1985

#### Hoofdstuk 5

- [42] KLM, *CF6-50 maintenance concept*, maart 1984
- [43] KLM, *Maintainability*, januari 1980
- [44] KLM, *Ruilartikeltaken en -onderhoud*, mei 1984
- [45] MAINTENANCE STEERING GROUP, *Airline/Manufacturer Maintenance Program Planning Document MSG-3*, ATA, Washington DC, oktober 1980
- [46] MOM, A.J.A., WANHILL, R.J.H., *Kostenbeheersing door introductie van een nieuwe levensduurfilosofie voor gasturbinewielen*, studie NLR, nr. SM 84-037L, juni 1986
- [47] MOXON, J., *7J7, Boeing sets the pace*, Flight International, oktober 1985
- [48] NOWLAN, F.S., *Reliability-Centered Maintenance*, voordracht op het Flight Mechanics Panel Symposium on Design to Cost and Life Cycle Cost, United Airlines, San Francisco, mei 1980
- [49] RITTER, H., *Experience with airborne software*, Proceedings of the 15th Annual Conference IFA, Swissair, november 1985
- [50] VOGELANG, L.B., GUNNIK, J.W., *Proceedings of the 15th Annual Conference IFA*, TU Delft, november 1985
- [51] WANHILL, R.J.H., *Engineering significance of fatigue thresholds and short fatigue cracks for structural design*, Fatigue, 1984

## Hoofdstuk 6

- [52] BOEHM, B., *Software Engineering Economics*, ISBN 0-13-822122-7
- [53] *Automatiseringsstatistiek deel A*, CBS, 1983
- [54] *Marktanalyse*, IDC, 1986
- [55] *Office automation trends and opportunities*, SRI, september 1985

## Hoofdstuk 7

- [56] BOORSMA, J., NIJDAM, L.M., *Design for Assembly*, VOA, augustus 1985
- [57] HELLMAN-TUITERT, G., KANIS, H., *Produktonderzoek ten behoeve van produktinformatie*, Swoka rapport nr. 18, 's-Gravenhage, 1983
- [58] HUPPES, G., KANIS, H., *Bezitsduurkosten*, Swokarapport nr. 23, 's-Gravenhage, 1985
- [59] RUMENNIK, V., *Power devices are in the chips*, IEEE Spectrum, juli 1985
- [60] *Levensduur neemt toe bij elektrische huishoudapparatuur*, ERM, 20 juni 1984
- [61] *Mean machines*, Which, februari 1986

## Hoofdstuk 8

- [62] ALTSHULER, A., *The future of the automobile*, Report of MIT's international automobile program, MIT, 1984, ISBN 0-262-01081-x
- [63] FERGUSON, E.T., *Product life and the automobile*, TNO, september 1983
- [64] KOUMANS, W.A., *Techniek: 12<sup>1</sup>/<sub>2</sub> jaar vervoer(ing)*, uittreerede TU Eindhoven, december 1984
- [65] LEE, A. VAN DER, BEMELMANS, TH.M.A., BEEK, W.J., *Technologisch verkennen, methoden en mogelijkheden*, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 's-Gravenhage, 1973
- [66] MC. ARTHUR, H., *Motor vehicle corrosion*, Metals & Materials, januari 1985
- [67] MURPHY, C., SMITH, S., *The retail motor trade 1983-1990*, Anco; the industrial training authority, Dublin, 1983
- [68] SLOAN, A.P., *My years with General Motors*, Penguin Business Library, 1986, ISBN 0-14-009106-8
- [69] *Autokostenprijsspeil*, ANWB, 1984
- [70] *De automobiëlbranche over 10 jaar*, BEVAM/PCBB, Voorschoten, maart 1986
- [71] *Enkele gegevens over de auto in de Nederlandse samenleving*, RAI, 1980



- [72] *Jaarverslag RAI, 1985*
- [73] *Projekt Langzeitauto, Porsche*
- [74] *Statistical Yearbook of the Netherlands, CBS, 1984*
- [75] *Statistiek van de motorvoertuigen, CBS, 1985*

---

## STT-publikaties

1. Toekomstbeeld der Techniek;  
ir. J. Smit, 1968
2. Techniek en Toekomstbeeld, Telecommunicatie in telescopisch beeld;  
prof.dr.ir. R.M.M. Oberman, 1968
3. Verkeersmiddelen;  
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1968
4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?;  
ir. P.H. Bosboom, 1969
5. De overgangprocedures in het verkeer;  
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1969
6. De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland;  
dr. P.J. van Duin, 1971
7. Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future;  
ir. J.H. Bakker e.a., 1971
8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze;  
ir. L. Schepers e.a., 1971
9. Het voeden van Nederland nu en in de toekomst;  
prof.dr.ir. M.J.L. Dols e.a., 1971
10. Barge Carriers: some technical, economic and legal aspects;  
drs. W. Cordia e.a., 1972
11. Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland;  
prof.dr. J.J. Went e.a., 1972
12. Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en consequenties;  
dr.ir. H. Hoog e.a., 1972
13. Communicatiestad 1985: elektronische communicatie met huis en bedrijf;  
prof.dr.ir. J.L. Bordewijk e.a., 1973
14. Techniek en preventief gezondheidsonderzoek;  
dr. M.J. Hartgerink e.a., 1973
15. Technologisch verkennen: methoden en mogelijkheden;  
ir. A. van der Lee e.a., 1973
16. Mens en milieu: beheerste groei;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973

17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
18. Mens en milieu: kringlopen van materie;  
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
19. Energy Conservation: ways and means;  
edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma, 1974
20. Voedsel voor allen, plaats en rol van de EEG;  
prof.dr. J. Tinbergen e.a., 1976
21. Stedelijk verkeer en vervoer langs nieuwe banen?;  
Redactie: ir. J. Overeem, 1976
22. Materialen voor onze samenleving;  
Redactie: ir. J.A. Over, 1976
23. De industrie in Nederland: verkenning van knelpunten en mogelijkheden;  
Redactie: ir. H.K. Boswijk en ir. R.G.F. de Groot, 1978
24. Toekomstbeeld der industrie;  
prof.dr. P. de Wolff e.a., 1978
25. Arts en gegevensverwerking;  
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1979
26. Bos en hout voor onze toekomst;  
Redactie: ir. T.K. de Haas, ir. J.H.F. van Apeldoorn en ir. A.C. Sjoerdsma, 1979
27. Steenkool voor onze toekomst;  
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1980
28. Distributie van consumentengoederen; informatie en communicatie in perspectief;  
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1980 (ISBN 90 6275 052 4)
29. Wonen en techniek; ervaringen van gisteren, ideeën voor morgen;  
Redactie: ir. J. Overeem en dr. G.H. Jansen, 1981  
(ISBN 90 6275 053 2)
30. Biotechnology; a Dutch Perspective;  
edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1981 (ISBN 90 6275 051 6)
31. Micro-elektronica in beroep en bedrijf; balans en verwachting;  
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981 (ISBN 90 6275 064 8)  
Deelstudies:
  - 31.1 Micro-elektronica: de rundveehouderij  
(ISBN 90 6275 066 4)
  - 31.2 Micro-elektronica: de grafische industrie en uitgeverijen  
(ISBN 90 6275 067 2)
  - 31.3 Micro-elektronica, procesinnovatie in de sector elektro-metaal (ISBN 90 6275 068 0)
  - 31.4 Micro-elektronica: productinnovatie van consumentenprodukten en diensten voor gebruik in huis  
(ISBN 90 6275 069 9)

- 31.5 Micro-elektronica: het ontwerpproces (ISBN 90 6275 070 2)  
31.6 Micro-elektronica: het bankwezen (ISBN 90 6275 071 0)  
31.7 Micro-elektronica: het kantoor (ISBN 90 6275 072 9)  
31.8 Micro-elektronica: het reiswezen (ISBN 90 6275 073 7)  
31.9 Micro-elektronica: de belastingdienst (ISBN 90 6275 074 5)
32. Micro-elektronica voor onze toekomst; een kritische beschouwing;  
Samenstellers: burggraaf E. Davignon e.a., 1982  
(ISBN 90 6275 089 3)
33. Toekomstige verwarming van woningen en gebouwen;  
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1982 (ISBN 90 6275 094 X)
34. Flexibele automatisering in Nederland; ervaringen en opinies;  
Redactie: ir. G. Laurentius, ir. H. Timmerman en ir. A.A.M. Vermeulen, 1982 (ISBN 90 6275 098 2)
35. Automatisering in de fabriek; vertrekpunten voor beleid;  
Redactie: ir. H. Timmerman, 1983 (ISBN 90 6275 112 1)
36. Informatietechniek in het kantoor; ervaringen in zeven organisaties;  
Samensteller: drs. F.J.G. Fransen, 1983 (ISBN 90 6275 135 0)
37. Nederland en de rijkdommen van de zee: industrieel perspectief en het nieuwe zeerecht;  
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.dr. Ph.J. de Koning Gans, 1983 (ISBN 90 6275 111 3)
38. Man and Information Technology: towards friendlier systems;  
edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1983 (ISBN 90 6275 136 9)
39. De kwetsbaarheid van de stad; verstoringen in water, gas, elektriciteit en telefonie;  
Redactie: ir. G. Laurentius, 1984 (ISBN 90 6275 145 8)
40. Bedrijf, kennis en innovatie;  
Redactie: ir. H. Timmerman, 1985 (ISBN 90 10 052745)
41. De toekomst van onze voedingsmiddelenindustrie;  
Redactie: drs. J.C.M. Schogt en prof.dr.ir. W.J. Beek, 1985 (ISBN 90 10 05574 4)
42. Techniek voor ouderen;  
Redactie: ir. M.H. Blom-Fuhri Snethlage, 1986  
(ISBN 90 10 06033 0)
43. Nieuwe toepassingen van materialen;  
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1986 (ISBN 90 14 03738 4)

De publikaties 1 t/m 27, 31-7, 31-9 en 34 zijn te bestellen bij  
STT

Postbus 30424

2500 GK 's-GRAVENHAGE

De overige publikaties zijn verkrijgbaar via de boekhandel.

# ONDERHOUDSBEWUST ONTWERPEN NU EN IN DE TOEKOMST

Een hoge betrouwbaarheid en lage onderhoudskosten worden steeds belangrijker. Dat geldt bijvoorbeeld voor wegen en woningen. Deze zijn in omvang sterk gegroeid, terwijl de middelen schaarser worden. Ook voor produktiemiddelen in de industrie waar kostenbeheersing en beheersing van de inzetbaarheid essentieel zijn voor de concurrentiekracht, geldt dat hoge betrouwbaarheid en lage onderhoudskosten van evident belang zijn. Bij duurzame consumentengoederen dwingt het door de Japanners toegepast zero-maintenance-concept de westeuropese fabrikant tot een nog grotere inspanning.

Dit alles was voor de Stichting Toekomstbeeld der Techniek aanleiding een inventarisatie te maken van de mogelijkheden om reeds tijdens het ontwerp de onderhoudsbehoefte te optimaliseren. De inventarisatie omvatte zowel nieuwe technieken als nieuwe methoden.

Zes bedrijfstakken werden in kaart gebracht: de wegenbouw, de bouw, de procesindustrie, de vliegtuigbouw, de kantoorautomatiseringssector en de sector duurzame consumentengoederen.

Via een systematische benadering van het ontwerp en onderhoud werden te verwachten wijzigingen in aard en omvang van het onderhoud geanalyseerd. Uit de analyse volgen mogelijkheden tot verbetering van de bestaande situatie. Deze mogelijkheden zijn zowel van organisatorische als technische aard.



**stichting toekomstbeeld der techniek**

ISBN 90 14 03716 3