

# SYSTEEMGERICHT SPARE PARTS MANAGEMENT BIJ DE NEDERLANDSE KONINKLIJKE MARINE

DR.IR. W.D. RUSTENBURG, DR.IR. G.J. VAN HOUTUM EN PROF.DR. W.H.M. ZIJM\*

## INLEIDING

Voorraadmanagement bij de Nederlandse Koninklijke Marine (KM) heeft primair betrekking op het voorzien van de vloot van alle artikelen en systemen die nodig zijn teneinde de schepen in staat te stellen hun missies naar behoren uit te voeren. Daarbij gaat het om zowel verbruiksartikelen (*consumables*) zoals brandstof en munitie, als gebruiksartikelen (*repairables*) die in principe tot de uitrusting van het schip behoren. De laatste groep artikelen dient uiteraard met name om in geval van een storing snel tot vervanging over te kunnen gaan en derhalve de operationele gereedheid van het schip zo hoog moge-

lijk te houden. De operationele gereedheid wordt hier gedefinieerd als het percentage van de tijd dat een schip beschikbaar is voor het uitvoeren van missies. Voor het totale contingent aan gebruiks- en verbruiksartikelen voor de gehele vloot wordt jaarlijks een budget ter beschikking gesteld. Het is intuïtief duidelijk dat er een bepaalde relatie bestaat tussen de operationele gereedheid en de ter beschikking gestelde budgetten. Die laatste nu staan onder grote druk: de veranderende oost-westverhoudingen en de nadruk op andere taken (vredeshandhaving) voor de diverse krijgsmachtonderdelen, alsmede een voortdurend streven naar een hogere efficiency, hebben een sterke neerwaartse trend in de beschikbare budgetten te zien ge-

## SAMENVATTING

*In dit artikel worden methoden ontwikkeld voor een doelgericht beheer van 'spare parts' bij de Nederlandse Koninklijke Marine. Daarbij gaat het in het bijzonder om reservedelen, 'subassemblies' en 'assemblies' die in geval van storing in een technisch systeem snel het defecte onderdeel of artikel kunnen vervangen. Door deze 'repair by replacement'-strategie wordt getracht de operationele beschikbaarheid van de technische systemen zo hoog mogelijk te houden. Een cruciale vraag betreft de hoeveelheid componenten, subassemblies of assemblies die hetzij op locatie hetzij in een centraal depot in voorraad moeten worden gehouden, rekening houdend met een beperkt investeringsbudget. Dit is het vraagstuk van de ini-*

*tiële bevoorrading. Echter, omdat een deel van de artikelen verbruiksartikelen zijn of omdat soms onherstelbare schade aan onderdelen is ontstaan, is jaarlijks ook een budget nodig voor inkoop van nieuwe onderdelen of artikelen. Ook rond deze zogeheten exploitatiebevoorrading doen zich vragen voor met betrekking tot de optimale aanwending van een per jaar beperkt, en niet overdraagbaar, budget. Voor beide vraagstukken worden methoden ontwikkeld en getest op real life systemen bij de marine. De resultaten zijn uitermate bevredigend, in die zin dat een belangrijk hogere beschikbaarheid van systemen wordt gerealiseerd, met gelijktijdig een significante verlaging van het in voorraad geïnvesteerd vermogen.*

\* DR.IR. W.D. RUSTENBURG STUDEERDE WERKTUIGBOUWKUNDE AAN DE UNIVERSITEIT TWENTE. TOT VOOR KORT WAS HIJ LUITENANT TER ZEE TECHNISCHE DIENST BIJ DE KONINKLIJKE MARINE TE DEN HELDER. TEGENWOORDIG IS HIJ ADVISEUR BIJ DISTRICON.

DR.IR. G.J. VAN HOUTUM STUDEERDE TOEGEPASTE WISKUNDE AAN DE TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN. HIJ IS VERBONDEN AAN DE VAKGROEP LOGISTIEKE BEHEERSINGSSYSTEMEN VAN DE FACULTEIT TECHNOLOGIE MANAGEMENT VAN DE TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN.

PROF.DR. W.H.M. ZIJM IS ALS HOGLERAAR OPERATIONS MANAGEMENT VERBONDEN AAN DE FACULTEIT TOEGEPASTE WISKUNDE VAN DE UNIVERSITEIT TWENTE EN AAN DE FACULTEIT TECHNOLOGIE MANAGEMENT VAN DE TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN. DAARNAAST IS HIJ WETENSCHAPPELIJK DIRECTEUR VAN HET CENTRUM VOOR TELEMATICA EN INFORMATIETECHNOLOGIE, EEN SPEERPUNT-ONDERZOEKINSTITUUT VAN DE UNIVERSITEIT TWENTE.

ven, een trend die naar verwachting nog enige tijd zal worden voortgezet.

In dit artikel concentreren we ons op de vraagstelling om, gegeven de beschikbare budgetten voor zowel de initiële bevoorrading als de exploitatiebevoorrading (zie hierna), een zo hoog mogelijke gereedheid van de verschillende vlootonderdelen van de KM na te streven. De vloot bestaat met name uit verschillende typen fregatten, mijnenbestrijdingsvaartuigen, onderzeeboten en kleinere vaartuigen. In het navolgende beperken wij ons tot het onderhoud van de technische systemen op een fregat. Een fregat wordt verondersteld niet beschikbaar te zijn wanneer preventief dan wel correctief onderhoud uitgevoerd moet worden. De tijden waarop preventief (tijdsduurafhankelijk, gebruiksduurafhankelijk) onderhoud uitgevoerd moet worden kunnen in de regel afgestemd worden op de planning van de missie (dat wil zeggen de vaarschema's). Correctief onderhoud (het opheffen van storingen door middel van reparatie of vervanging) kan echter voor serieuze problemen zorgen. Om de benodigde tijd voor correctief onderhoud te minimaliseren wordt de *repair by replacement*-strategie veelvuldig toegepast. Deze strategie vereist uiteraard de aanwezigheid van reserveonderdelen (*spare parts*). De logistieke beschikbaarheid van een schip wordt nu gedefinieerd als het percentage van de tijd dat het schip niet down is als gevolg van de afwezigheid van reserveonderdelen of -systemen. In dit artikel is de term beschikbaarheid vanaf nu synoniem met logistieke beschikbaarheid.

De relatie tussen het budget voor spare parts en beschikbaarheid wordt duidelijk tijdens zowel de initiële bevoorrading als de exploitatiebevoorrading. De initiële bevoorrading wordt uitgevoerd wanneer een nieuwe scheepsklasse in de vaart komt. De leveranciers stellen in dit kader een 'Lijst van aanbevolen reserveonderdelen' op. Het probleem is echter dat het bedrag dat benodigd is om alle onderdelen op deze lijst aan te kopen, het beschikbare budget veelal overschrijdt. De praktijk op dit moment is dat er onderdelen geschrapt worden van deze lijst zonder echt goed de consequenties voor de beschikbaarheid in te kunnen schatten.

**FIGUUR 1.** RIJKSWERF KONINKLIJKE MARINE, DEEL VAN HET MARINEBEDRIJF, VERANTWOORDELIJK VOOR ONDERHOUD EN MATERIAALLOGISTIEK TEN BEHOEVE VAN PLATFORM-, VOORSTUWING- EN ENERGIESYSTEMEN



Eenzelfde type probleem doet zich voor in de exploitatiefase. Dit is de operationele periode van het schip die normaal gesproken circa dertig jaar duurt. Jaarlijks krijgt de KM een budget om voorraden aan te vullen. De noodzaak voor die aanvulling ligt in het feit dat consumables gebruikt worden maar ook omdat repairables onherstelbaar defect raken (*condemnation*). Als nu het herbevoorradingbudget oneindig is, kunnen de voorraadvolumes die tijdens de initiële bevoorrading bepaald zijn, altijd gehandhaafd blijven. De praktijk bij de KM is echter anders. Op dit moment dekt het huidige jaarlijkse herbevoorradingbudget bij lange na niet de verwachte jaarvraag. De keuze van artikelen waarvan al dan niet voorraadvolumes worden verlaagd, is op zijn zachtst gezegd nogal arbitrair.

Deze problematiek heeft geleid tot de wens om modellen en technieken te ontwikkelen die de initiële bevoorrading en exploitatiebevoorrading bij de KM effectief kunnen ondersteunen. Hierbij dient met name de relatie tussen budgetten en beschikbaarheid te worden geëxpliciteerd. Hiermee verwerft het Marinebedrijf, tevens verantwoordelijk voor de bevoorrading, zich tevens een betere positie in haar onderhandelingen met de centrale marineleiding wanneer er beslissingen moeten worden genomen over de hoogte van het budget. Derhalve zijn de resultaten van deze studie, behalve voor de operationele bedrijfsvoering, ook in strategisch opzicht van belang.

Een belangrijke aanzet voor een theorie die expliciet de relatie legt tussen beschikbare budgetten en operationele systeemgereedheid wordt, althans voor de initiële bevoorrading, gevormd door de oorspronkelijk in de jaren zestig voor de Amerikaanse luchtmacht ontwikkelde METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*)-modellen. (Sherbrooke, 1968). Uitbreidingen met betrekking tot complexere productstructuren (*multi-indenture* systemen) werden gerealiseerd door Muckstadt (1973) en Sherbrooke (1986). In al deze modellen worden exponentiële 'faalintensiteiten' en een oneindige reparatiecapaciteit verondersteld, waardoor op basis van Palms theorema het aantal in reparatie zijnde onderdelen altijd een Poisson-verdeling heeft. Het zal duidelijk zijn dat gemiddelde en variantie van dit laatste aantal in belangrijke mate bepalend zijn voor het aantal op voorraad te leggen reserveonderdelen. Slay (1984) en Graves (1985) relaxeren de aanname van een Poisson verdeeld aantal in reparatie zijnde onderdelen. Ten slotte is - meer recent - aandacht besteed aan systemen waarin de reparatiecapaciteit als begrensd wordt verondersteld (Albright, 1989; Díaz & Fu, 1979; Avsar & Zijm, 2000).

In dit artikel zullen we eerst dieper ingaan op de huidige methodiek voor spare parts management bij de KM. Vervolgens bespreken we kort de noodzaak van een bevoorradingstrategie die primair gericht is op een zo hoog mogelijke operationele gereedheid van complexe technische systemen (systeembenadering). Daarna gaan we in op de essentie van de

METRIC-theorie en een aantal uitbreidingen voor de initiële bevoorrading en laten aan de hand van een voorbeeldsysteem zien op welke wijze een op METRIC gebaseerde systeembenadering zich onderscheidt van meer klassieke benaderingen in de voorraadtheorie, zoals de op vaste servicegraden gebaseerde itembenadering. Vervolgens gaan we in op de problematiek rondom de exploitatiebevoorrading. Opnieuw wordt slechts de essentie van de methodiek uitgelegd, waarna wordt ingegaan op een aantal resultaten, in het bijzonder een vergelijking van een nieuw voorgestelde strategie met de huidige wijze van werken. In de voorlaatste paragraaf wordt een aantal evaluaties van complexe KM-systemen besproken en wordt aangetoond dat de in dit artikel voorgestelde methoden tot aanzienlijke besparingen en tegelijkertijd tot een hogere systeembeschikbaarheid kunnen leiden. Ten slotte worden conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek gepresenteerd.

Alhoewel de essenties van de methodieken in dit artikel worden aangeduid, wordt niet in detail ingegaan op de wiskundige achtergronden van de analyse van met name multi-echelon, multi-indenture systemen (alhoewel het deze systemen zijn die uiteindelijk zijn onderzocht). Ook voor de exploitatiebevoorrading wordt slechts ingegaan op de essentie van de nieuw voorgestelde herbevoorradingstrategie. Voor een volledig overzicht van de wiskundige analyse wordt de lezer verwezen naar Rustenburg (2000) en Rustenburg, Van Houtum en Zijm (2000a, 2000b).

#### HUDIG VOORRAADMANAGEMENT BIJ DE KM

##### *Initiële bevoorrading*

Zoals reeds vermeld in de inleiding, verloopt binnen de KM de initiële bevoorrading nogal problematisch. Het (zelfs recente) verleden heeft geleerd dat in deze fase een veel te groot aantal artikelen aangekocht wordt dat later nooit meer nodig blijkt te zijn, terwijl tegelijkertijd veel artikelen niet aangekocht worden die achteraf wel nodig blijken te zijn. Dit leidt tot de aanwezigheid van zogenoemde dode voorraad (*non-movers*) en tegelijkertijd tot *crash*-acties teneinde noodzakelijke artikelen alsnog versneld aan te schaffen.

Het is duidelijk dat de fase van de initiële bevoorrading nogal eens door veel onzekerheid gekenmerkt wordt. Immers, vooral bij nieuwe installaties zijn onder andere levensduren of MTBF's (*Mean Time Between Failures*) veelal moeilijk in te schatten. De kwaliteit van de input zal dus altijd een punt van zorg blijven. Dit laat echter onverlet dat het wel verstandig is om een zekere mate van objectieve ondersteuning te ontwikkelen. Daarbij lijkt het gewenst modellen en ondersteunende systemen te ontwikkelen die enigszins robuust zijn met betrekking tot mogelijke variaties in de input (bijvoorbeeld *failure rates*).

Bij aanvang van deze studie beschikte de KM over een

systeem ten behoeve van de bepaling van boord- en walreserve voor een aantal wapen- en commandosystemen. Met name voor multi-indenture en multi-echelon systemen bleek het huidige systeem niet toegerust. Omdat ook geen alternatief commercieel systeem voorhanden bleek, is besloten om op basis van een diepgaande analyse de karakteristieken van een te ontwikkelen nieuwe bevoorradingssystematiek te ontwerpen.

##### *Exploitatiebevoorrading*

In de huidige situatie kent de KM één type herbevoorradingstrategie en dat is de (*s,Q*)-strategie. Voor ieder product wordt het bestelniveau *s* gelijk gekozen aan de gemiddelde vraag gedurende de levertijd (ook wel verwervingstijd geheten) plus een fractie van de standaarddeviatie van de vraag gedurende de levertijd. De bestelhoeveelheid *Q* is gelijk aan de vraag gedurende een jaar. Daarbij zij aangetekend dat, anders dan in klassieke voorraadmodellen, de bestelhoeveelheid *Q* niet het resultaat is van een afweging tussen bestelkosten en voorraadkosten. De meeste overheidsorganisaties krijgen jaarlijks budgetten toegekend. Dat betekent dat deze organisaties geen afweging kunnen maken tussen het aanschaffen van reservedelen en het daardoor niet incasseren van rente versus het niet aanschaffen van reservedelen en het daardoor wel incasseren van rente-inkomsten. Ofwel, overwegingen zoals ten grondslag liggend aan de *Economic Order Quantity* (EOQ) (zie bijvoorbeeld Silver, Pyke & Peterson, 1998) zijn niet van toepassing op een organisatie als de KM.

Al enige tijd is onderkend dat de genoemde (*s,Q*)-strategie een onwerkbaar situatie oplevert. Immers de goedkope, snelopende consumables krijgen precies evenveel aandacht als de dure repairables. Inmiddels is een ABC-classificatie (Silver, Pyke & Peterson, 1998) gemaakt van het KM-artikelenpakket dat gerelateerd is aan het onderhoud. Voor elke categorie is vervolgens een strategie ontwikkeld (zie ook hierna). De resultaten van deze analyse zullen in hun geheel worden geïmplementeerd.

#### SYSTEEM- VERSUS ITEM BENADERING

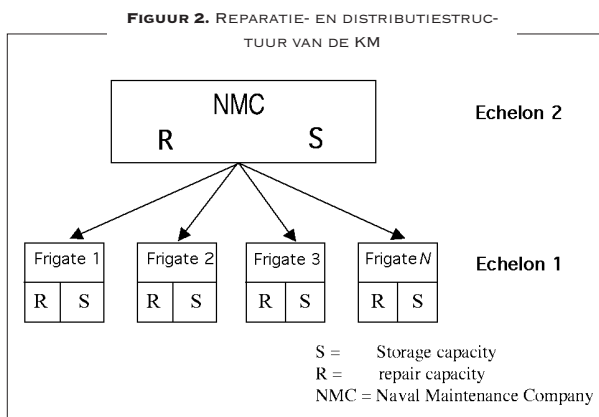
Alhoewel de ABC-classificatie een belangrijke vooruitgang betekent ten opzichte van de bestaande situatie, is er nog zeker veel ruimte voor verdere verbetering. Een belangrijk kenmerk van de strategieën die gebruikt worden voor de verschillende klassen artikelen, is dat zij geen relatie leggen tussen enerzijds individuele artikelen en anderzijds een systeem als geheel. Het is intuïtief duidelijk dat er een relatie aanwezig is tussen de eisen die aan de beschikbaarheid van een systeem worden gesteld en de eisen die daardoor aan de beschikbaarheid van de onderliggende onderdelen gesteld moeten worden. De benadering waarbij een expliciete relatie gelegd wordt tus-

sen de operationele gereedheid van een technisch systeem en de beschikbaarheid van de constituerende artikelen, wordt de systeembenadering genoemd. Op basis van een dergelijke benadering dienen vragen te worden beantwoord als: welke gereedheid kan maximaal gerealiseerd worden bij een bepaald budget? Of, welk budget is minimaal benodigd om een vooraf gewenste operationele gereedheid (*target availability*) te realiseren? Essentieel in een systeembenadering is dat voorraadniveaus en servicegraden afgeleiden zijn van dit type vragen.

Toepassing van een ABC-classificatie past in feite binnen een itembenadering. Bij deze aanpak wordt voor ieder item op zich een zekere servicegraad gesteld, zonder daarbij een directe relatie te leggen met de systeembeschikbaarheid. Voor grote groepen artikelen wordt in het algemeen eenvoudig dezelfde servicegraad ingesteld en aan de hand van die servicegraad worden de voorraadniveaus bepaald. Zo is binnen de KM in de huidige situatie één servicegraad voor het totale artikelpakket (75%) ingesteld. Belangrijk is dat in een itembenadering de systeembeschikbaarheid dan wel de benodigde budgetten geen direct beïnvloedbare factoren zijn.

Het bovenstaande betekent niet dat een itembenadering per se minder is dan een systeembenadering. Zoals we in volgende paragrafen zullen zien is de invulling van de systeembenadering voor zowel de initiële bevoorrading als de exploitatiebevoorrading tamelijk complex. Daarnaast vereist een systeembenadering meer inputdata dan de itembenadering; zo moet bijvoorbeeld de architectuur (de *material breakdown*) van een systeem volledig bekend zijn. De itembenadering is betrekkelijk eenvoudig; men hoeft alleen maar gegevens bij te houden van individuele items (vraag, levertijd, hersteltijd enzovoort). Kortom, besparingen op voorraden bij het gebruik van een systeembenadering moeten opwegen tegen de benodigde extra inspanningen die een systeembenadering met zich meebrengt.

In het onderzoek is nu gekozen voor de volgende indeling in artikelpakketten. Systeemgebonden repairables en con-



sumables met een waarde groter dan f 250 worden meegenomen in de systeembenadering. Op het resterende pakket wordt een itembenadering toegepast. Uiteraard kan binnen het laatstgenoemde pakket weer een ABC-classificatie toegepast worden.

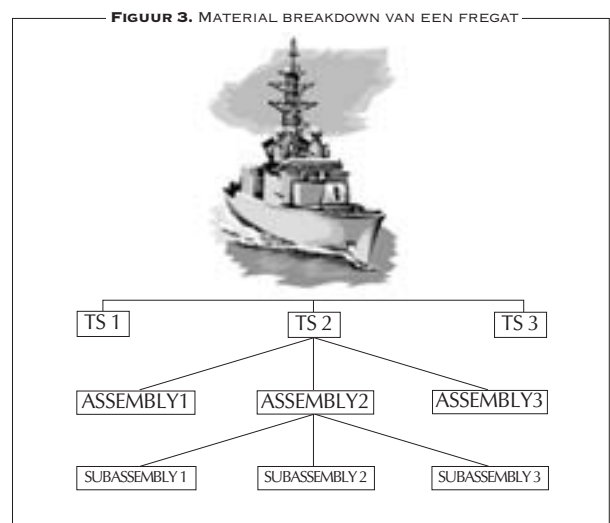
In de volgende paragraaf gaan we nader in op de wijze waarop een systeembenadering toegepast kan worden op de initiële bevoorrading. Vervolgens wordt de werking van de methode aan de hand van een voorbeeld gedemonstreerd. Daarna wordt op hoofdlijnen besproken hoe een systeembenadering kan worden ontwikkeld voor gebruik in de exploitatieperiode van systemen.

**INITIËLE BEVOORRADING**

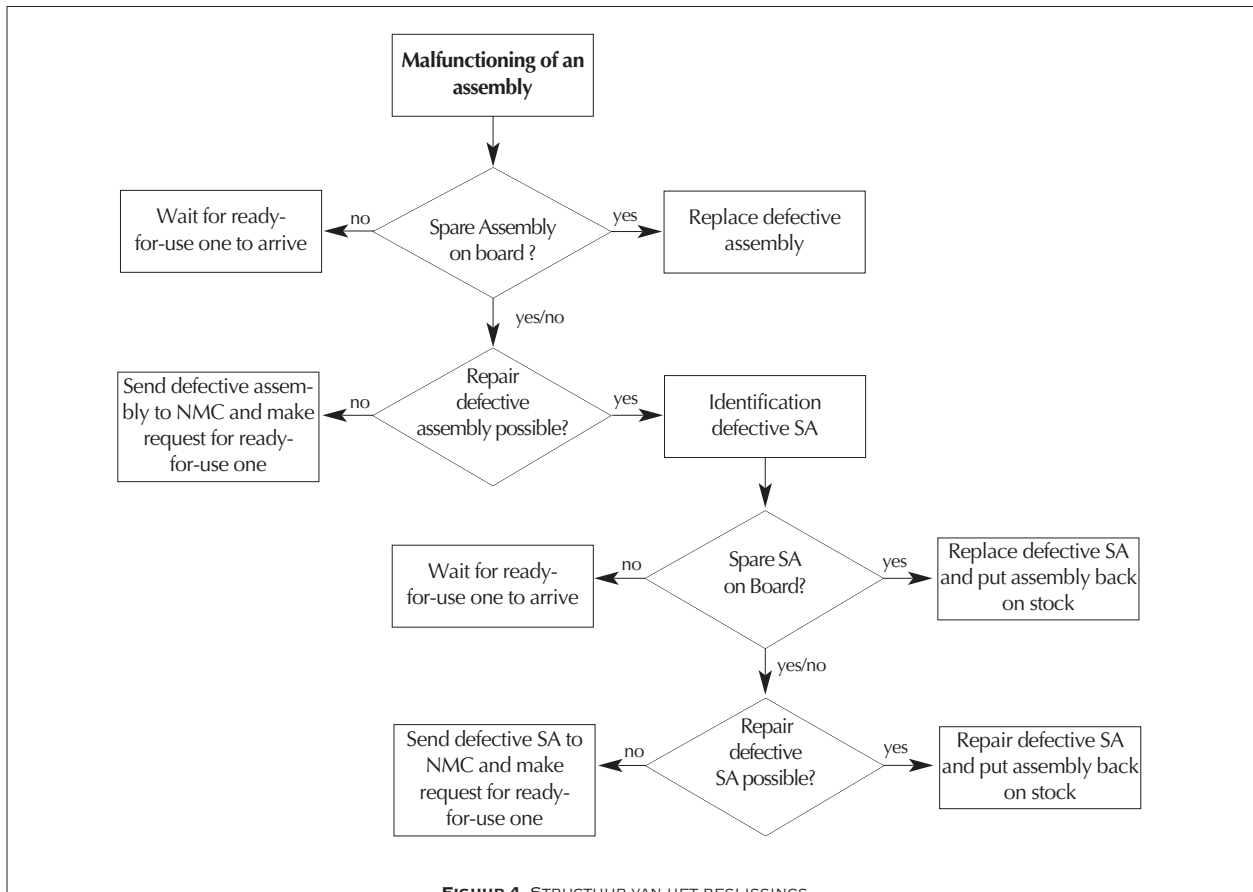
*Structuur van het vervangings- en reparatieproces*

De KM kan met haar vloot over de gehele wereld missies uitvoeren. Als een systeem faalt gedurende een missie, dan repareert de technische dan wel wapentechnische dienst het systeem door het vervangen van een defect onderdeel door een werkend reserveonderdeel. Het defecte onderdeel kan soms aan boord gerepareerd worden; als dat echter niet het geval is wordt het betrokken onderdeel naar één van de *repair shops* van het Marinebedrijf gestuurd. Tegelijkertijd wordt een nieuw onderdeel aangevraagd bij het Marinebedrijf. Het initiële bevoorradingsprobleem kent derhalve twee echelons; het Marinebedrijf op centraal niveau en de fregatten op decentraal niveau. De twee-echelon reparatie- en distributiestructuur is afgebeeld in figuur 2.

Van belang zijn verder de onderlinge relaties tussen de reserveonderdelen in de structuur van de technische systemen, de zogenoemde material breakdown. Voor dit moment wordt



BEDRIJFSKUNDE, JAARGANG 73, 2001 NR. 2



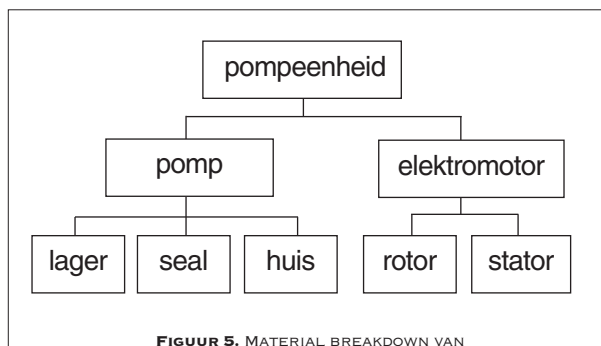
FIGUUR 4. STRUCTUUR VAN HET BESLISSINGSPROCES (NMC = NAVAL MAINTENANCE COMPANY)

aangenomen dat een systeem bestaat uit twee niveaus: *assemblies* op het eerste niveau en *subassemblies* op het tweede niveau. De material breakdown is geschetst in figuur 3 (hierin staat TS voor Technisch Systeem; op het niveau van systemen legt men geen reserveonderdelen op voorraad).

Vervolgens gaan we iets dieper in op het reparatie- en distributieproces. Als een technisch systeem faalt, dan is dat in eerste instantie te wijten aan één bepaalde onderliggende assembly. Deze kapotte assembly wordt vervangen door een reserve-assembly, mits deze in voorraad is. Vervolgens wordt beoordeeld of de technische dienst het defect kan herstellen. Als dat het geval is dan moet vastgesteld worden welke sub-assembly (SA) de feitelijk oorzaak was van het defect. Na vervanging van de betrokken SA, is de defecte assembly gerepareerd. Mogelijkerwijs is de assembly niet te repareren aan boord. In dat geval vindt reparatie bij het Marinebedrijf plaats. Ook daar moet worden nagegaan welke SA de feitelijke oorzaak was van het defect. In de regel wordt bij het Marinebedrijf het complexere onderhoud uitgevoerd. Het reparatie- en distributieproces van de defecte SA's volgt in feite dezelfde weg als dat van de assemblies. De reparatie is alleen niet meer afhanke-

lijk van onderliggende onderdelen. Een overzicht van de beslissingsstructuur wordt gegeven in figuur 4.

In de context van dit artikel voert het te ver in te gaan op de wiskundige methodieken die ten grondslag liggen aan de METRIC-methodiek (zie hiervoor bijvoorbeeld Rustenburg, Van Houtum & Zijm, 2000a; Rustenburg, 2000). De essentie van de methodiek is dat een relatie wordt gelegd tussen de investeringen in spare parts, ofwel de initieel gealloceerde voorraden voor elke type reservedeel of subassembly, en de op basis van deze voorraden te realiseren systeembeschikbaarheid. Anders dan in de klassieke voorraadtheorie wordt daarbij niet zozeer op afzonderlijke servicegraden gestuurd, maar is het juist de combinatie van de geregistreerde faalkansen van elk onderdeel en de kostprijs van dat onderdeel die bepalen hoe hoog de voorraad precies moet zijn. In het bijzonder leidt dat tot een situatie waarin voor een goedkoper onderdeel een hogere voorraad wordt aangehouden dan voor een duur onderdeel (onder aanname van gelijke faalintensiteit); immers per gulden geïnvesteerd vermogen levert het goedkope onderdeel een hogere bijdrage aan de systeembeschikbaarheid dan het dure. Uiteraard spelen daarbij ook



FIGUUR 5. MATERIAL BREAKDOWN VAN VOORBEELDIINSTALLATIE

doorlooptijden in het reparatieproces een rol; een substantiële reductie van deze doorlooptijd impliceert dat ook de benodigde voorraad van het betreffende reservedeel kan worden verlaagd. Op basis hiervan kan tevens een afweging worden gemaakt tussen investering in reparatiecapaciteit versus investering in voorraden. De METRIC-methode stelt ons in staat op basis van faalkansen, reparatiedoorlooptijden, prijzen van onderdelen en uiteraard de systeemconfiguraties, de optimale voorraadhoogten te bepalen, gegeven een beschikbaar budget. Optimaal betekent in dit verband dat, gegeven een beschikbaar budget, voorraadhoogten zodanig worden vastgesteld dat de systeembeschikbaarheid wordt gemaximaliseerd. In de volgende sectie illustreren we aan de hand van een voorbeeldsysteem de resultaten van een analyse gebaseerd op de METRIC-methode.

*Toepassing op een voorbeeldsysteem*

Hier wordt een voorbeeld uitgewerkt dat gebaseerd is op een beperkte versie van het brandblussysteem zoals dat op de Multi-Purpose fregatten (ook wel M-fregatten genoemd) is geïnstalleerd. In figuur 5 is de material breakdown van deze installatie weergegeven.

De systeemstructuur bestaat in dit geval uit drie niveaus met in totaal acht items. De items op de eerste twee niveaus zijn repairables en de items op het derde niveau zijn consumable items. De inputdata zijn weergegeven in tabel 1 (althans het voor dit betoog meest relevante deel daarvan) en zijn voor een deel ontleend aan het voorraadadministratiesysteem van de KM (de data zijn enigszins gemanipuleerd om het verschil tussen een systeembenadering en itembenadering meer expliciet te maken; in een latere paragraaf zullen de ervaringen van het model bij een aantal real-life systemen behandeld worden).

Voor een aantal verschillende hoogten van het te investeren budget is het volgende bepaald.

- De logistieke beschikbaarheid die voor het gegeven budget bereikt kan worden.
- De aantallen onderdelen per item die bij respectievelijk drie fregatten en het centrale depot van het Marinebedrijf dienen te worden neergelegd om die beschikbaarheid te bereiken.
- De servicegraad per item.

In tabel 2 is per investering aangegeven wat de behaalde gereedheid is. Tevens zijn de resultaten in een grafiek (figuur 6) weergegeven. In tabel 3 is voor één specifiek budget (en dus voor één combinatie van investering en gerealiseerde gereedheid) aangegeven wat per artikel de allocatie bij ieder van de drie fregatten en het centrale depot is, alsmede de servicegraad per item.

De trend van de grafiek spreekt intuïtief aan. Met een relatief geringe investering kan een relatief grote toename in de gereedheid bewerkstelligd worden. Bij een wat hogere gereedheid kost het een relatief grote investering om dezelfde toename te realiseren. In het algemeen kunnen dergelijke grafieken gebruikt worden voor het maken van *trade-offs* tussen kosten en gereedheid.

TABEL 1. INPUTDATA VOOR VOORBEELDIINSTALLATIE

Naam onderdeel	kosten (\$)	rep_tijd base (years)	rep_tijd base/verwerv_tijd (years)	order- en transporttijd (years)
pompeenheid	25.000	0.02	0.50	0.03
pomp	2.500	0.01	0.30	0.02
lager	100	-	0.10	0.02
seal	400	-	0.10	0.02
huis	150	-	0.10	0.02
elektromotor	2.000	0.01	0.30	0.02
rotor	300	-	0.10	0.02
stator	200	-	0.10	0.02

Investering (\$)	logistieke gereedheid (%)
50.450	9,0
60.150	16,9
141.150	41,7
258.150	71,3
359.050	86,6
515.050	93,2

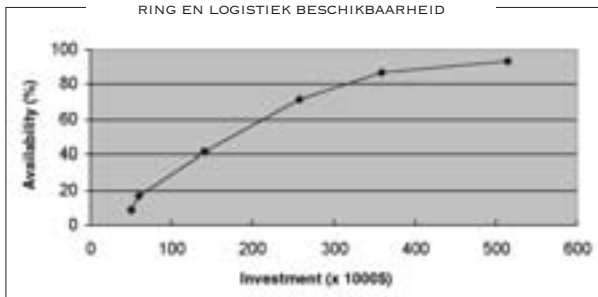
TABEL 2. INVESTERING VERSUS LOGISTIEKE GEREEDHEID

Uit tabel 3 blijkt dat de servicegraden<sup>1</sup> van de individuele items behoorlijk van elkaar verschillen. We zien dat de servicegraden van de goedkopere items redelijk hoog zijn, en die van de duurdere items verhoudingsgewijs laag. Dat resultaat is verklaarbaar: het kost betrekkelijk weinig geld om voor goedkopere items toch een vrij hoge servicegraad te realiseren. Daarentegen is het voor dure items financieel gezien onaantrekkelijk een hoge servicegraad te realiseren. Verder zien we dat de servicegraad bij het Marinebedrijf aanzienlijk lager is dan bij de fregatten. Single-echelon modellen bepalen de voorraden op de verschillende echelons separaat. Op basis van dit type modellen wordt op het niveau van het centraal depot vaak meer voorraad gealloceerd dan noodzakelijk.

*Versillen item- en systeembenadering gekwantificeerd*

Bij de itembenadering wordt vooraf vastgelegd wat per item de gewenste servicegraad is. Een andere mogelijkheid is

FIGUUR 6. TRADE-OFF-CURVE TUSSEN INVESTERING EN LOGISTIEK BESCHIKBAARHEID



TABEL 3. ALLOCATIE INDIVIDUELE ARTIKELN PER FREGAT EN BIJ HET DEPOT BIJ EEN BUDGET VAN FL. 515.050 EN EEN OPERATIONELE GEREEDHEID VAN 93,2% (LAATSTE COMBINATIE UIT TABEL 2)

item	allocatie per base	allocatie depot	servicegraad base (%)	servicegraad depot (%)
pompeenheid	5	2	98	70
pomp	4	4	98	79
lager	2	9	99	98
seal	2	7	98	92
huis	2	9	99	97
elektromotor	3	5	97	86
rotor	2	7	99	94
stator	2	10	99	96

om een budget vast te stellen en op basis daarvan een servicegraad vast te stellen. Het is niet mogelijk direct een uitspraak te doen over de logistieke gereedheid van een systeem.

Normaal gesproken wordt bij een itembenadering een servicegraad vastgesteld voor een groep van items. In de nu volgende vergelijkende test is deze procedure ook gevolgd. Op basis van een aantal vooraf ingestelde servicegraden (steeds voor alle items uit de pompeenheid dezelfde servicegraad) is bepaald welke voorraadniveaus minimaal noodzakelijk zijn om aan die servicegraad te voldoen. Op basis van deze voorraadniveaus kan weer de logistieke gereedheid bepaald worden. Via deze omweg kan dus ook bij de itembenadering een link gelegd worden tussen investering en gereedheid. In tabel 4 zijn de resultaten van de itembenadering beschreven.

De resultaten van de itembenadering zijn vervolgens vergeleken met die uit de systeembenadering (zie figuur 7). Uit de grafiek blijkt dat een itembenadering altijd minder goed presteert dan de systeembenadering in de zin dat het meer kost om een bepaalde gereedheid te realiseren.

De systeembenadering is ook toegepast op een uitgebreidere selectie van onderdelen uit het brandblussysteem van een M-fregat. De resultaten versterkten de conclusies uit de eerste, hierboven gerapporteerde test. Met de bestaande werkwijze (dat wil zeggen op basis van een itembenadering) werd een gereedheid van 98 procent gerealiseerd met een investering van circa f 230.000 in reservedelen. Toepassing van de systeembenadering liet zien, dat eenzelfde gereedheid ook gerealiseerd kon worden met een investering van f 60.000.

Hierbij past overigens een kanttekening. Bij laatstgenoemde investering is geen rekening gehouden met het bewust op voorraad leggen van zogenoemde risicodelen. Het enige onderdeel dat hiervoor in aanmerking zou kunnen komen is de elektromotor (magazijnprijs f 50.000). In de op basis van de systeembenadering uitgevoerde berekening blijkt het niet noodzakelijk dat onderdeel op voorraad te leggen. Stel dat we die elektromotor wel op voorraad zouden leggen, dan zou de (ini-

Ingestelde servicegraad	Investering (\$)	Logistieke gereedheid(%)
30	207.000	16,3
50	246.100	47,0
70	308.000	67,0
80	389.000	81,3
90	534.400	92,5

TABEL 4. RESULTATEN BIJ ITEM-BENADERING

tiële) investering oplopen tot f 110.000. Ook dan zou dus nog een besparing van ruim 50 procent kunnen worden gerealiseerd.

Later in dit artikel gaan we in op de resultaten van een vergelijking van item- en systeembenadering voor drie complete (en complexe) technische systemen, te weten een wapensysteem, een radarsysteem en een dieselmotorsysteem.

**EXPLOITATIEBEVOORADING**

Er lijkt een hoge mate van analogie te bestaan tussen de exploitatiebevoorrading en de initiële bevoorrading. Bij de laatste vorm van bevoorrading wordt eenmalig een budget ter beschikking gesteld met het doel binnen die budgetgrenzen de logistieke beschikbaarheid te maximaliseren. Bij de exploitatiebevoorrading krijgt men ieder jaar een bepaald (taakstellend) herbevoorradingbudget en ook dat budget moet zodanig worden besteed dat de beschikbaarheid over het jaar gemaximaliseerd wordt, dan wel dat een bepaalde targetbeschikbaarheid wordt gerealiseerd.

Toch bestaan er wezenlijke verschillen tussen de dynamiek van de exploitatiebevoorrading en de initiële bevoorrading. Zoals de naam al suggereert hebben we bij de initiële bevoorrading te maken met een eenmalige investering. Bij de exploitatiebevoorrading moeten de investeringen gespreid worden over de tijd. Indien het exploitatiebudget oneindig hoog zou zijn, dan zouden de voorraadniveaus, zoals bepaald tij-

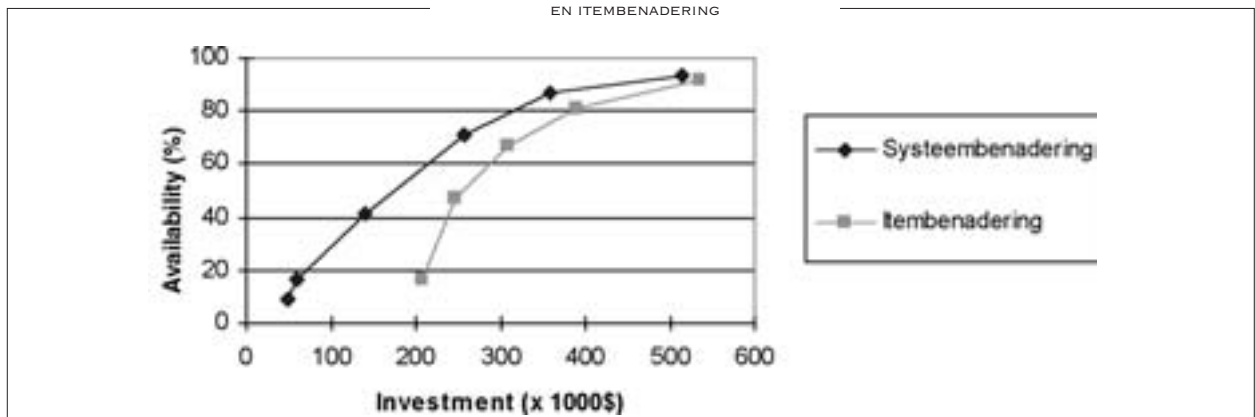
dens de initiële fase, altijd gehandhaafd kunnen blijven. Dit is in werkelijkheid zelden het geval. Sterker nog: binnen de KM zijn de beschikbare budgetten onvoldoende om de verwachte behoefte te dekken. Relevante vragen in dit kader zijn daarom:

- Wanneer en op basis van welke indicatoren moeten de voorraadniveaus van welke artikelen verlaagd worden opdat de gemiddelde gereedheid gedurende een budgetjaar gemaximaliseerd wordt (gegeven het beperkte budget)?
- Kan bij het beantwoorden van de eerste vraag rekening gehouden worden met een minimum gereedheid aan het einde van een budgetjaar? Het is uiteindelijk denkbaar dat bij een hoge gereedheid gedurende de eerste, zeg, negen maanden en een lage gereedheid in de laatste drie maanden, toch een redelijk bevredigende gemiddelde gereedheid bereikt wordt. De kans is dan echter groot dat in de laatste drie maanden een aantal schepen gedwongen aan de kade ligt. Hoewel dit voorbeeld enigszins gechargeerd is, geeft het wel de noodzaak aan aandacht te schenken aan een minimale gereedheid aan het eind van het jaar.
- Kan het verband tussen de herbevoorradingbudget en gemiddelde operationele gereedheid expliciet gemaakt worden?

Bestaande voorraadmodellen geven geen antwoord op deze vragen. Deze modellen gaan er namelijk onder andere van uit dat er voldoende budget is om aan de behoefte te voldoen. Veelal vindt er in die modellen een soort optimalisatie plaats tussen voorraadkosten en bestelkosten. Zoals eerder vermeld zijn voorraadkosten voor de KM niet zozeer opportuun en levert deze optimalisatie dus niets op.

Voor het beantwoorden van bovenstaande vragen blijven opnieuw de trade-off-curven die het verband tussen een bepaald voorraadinvesteringbudget en de optimale beschikbaarheid vastleggen essentieel (zie figuur 6). Merk op dat bij

FIGUUR 7. VERGELIJKING RESULTATEN SYSTEEM- EN ITEM-BENADERING





elke combinatie van investeringshoogte en beschikbaarheid ook een bepaalde allocatie van artikelen aan voorraden behoort, met per artikel verschillende voorraadhoogten en servicegraden. Intuïtief is duidelijk dat het verstandig lijkt om, voor elk nog beschikbaar budget de voorraadhoogten zo aan te passen dat we zo dicht mogelijk bij de allocatie van de trade-off-curve blijven. Dat zal niet altijd mogelijk zijn; bij een budget dat kleiner is dan nodig om de initiële voorraadhoogten te handhaven zullen nieuwe normvoorraden worden vastgesteld, corresponderend met een lager punt op de trade-off-curve. Voor artikelen die boven die nieuwe norm zitten geldt een aanschafstop, artikelen onder de nieuwe norm kunnen nog steeds worden aangeschaft. Deze redenering vormt de essentie van de algorithmiek die de beslissingondersteuning levert voor mogelijke aanschafacties, afhankelijk van de resterende duur van de budgetperiode en de momentane aantallen reservedelen in voorraad of in reparatie. Voor een volledige uitwerking van de wiskundige methodiek verwijzen we naar Rustenburg, Van Houtum en Zijm (2000b). Om te laten zien op welke wijze we tot een optimale aanschafstrategie komen ('optimaal' opnieuw in de zin van de te realiseren maximale systeembeschikbaarheid) redeneren we als volgt.

Laat  $(y, t)$  een tijdstip in jaar  $y$  aanduiden, waarbij  $0 \leq t \leq 1$  (ofwel  $(y, 1)$  geeft het eind van jaar  $y$  aan). We veronderstellen dat in een jaar op vaste tijdstippen  $t_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , de voorraden worden geïnspecteerd waarna zo nodig aankoopbeslissingen worden gegenereerd mits het beschikbare budget dat toelaat. Laat  $B(y, t_k)$  het resterende 'beschikbare' herbevoorradingbudget voor jaar  $y$  zijn op tijdstip  $t_k$ . Het op dat tijdstip resterende benodigde budget  $\beta(y, t_k)$ , uitgaande van een aanvulling van de actuele voorraden tot de initieel bepaalde voorraadhoogten en een volledige compensatie van de in de rest van het jaar te verwachten afschrijvingen, kan eveneens worden bepaald (zie voor een wiskundige formalisering Rustenburg, Van Houtum & Zijm, 2000b). Wanneer nu geldt dat  $B(y, t_k) < \beta(y, t_k)$  (ofwel, het beschikbare resterende budget is onvoldoende om alle verwachte benodigde aankopen te realiseren), dan selecteren we het hoogst mogelijke punt op de investeringsbeschikbaarheid trade-off-curve, waarvoor geldt dat de bijbehorende verzameling van voorraadpunten nog net kan worden gerealiseerd. Met andere woorden: we bepalen het hoogste punt op de trade-off-curve zodanig dat aanvulling tot de bijbehorende niveaus alsmede compensatie van de nog te verwachten afschrijvingen nog juist binnen het beschikbare budget valt. Daarbij kan zich het feit voordoen dat voor sommige artikelen een gewenst voorraadniveau niet helemaal kan worden gehaald, omdat van andere artikelen de voorraden, afgezet tegen de nieuw bepaalde normen, al te hoog blijken te zijn, bijvoorbeeld doordat in een eerder stadium nog is aangekocht en desinvesteringen nu eenmaal niet zijn toegestaan.

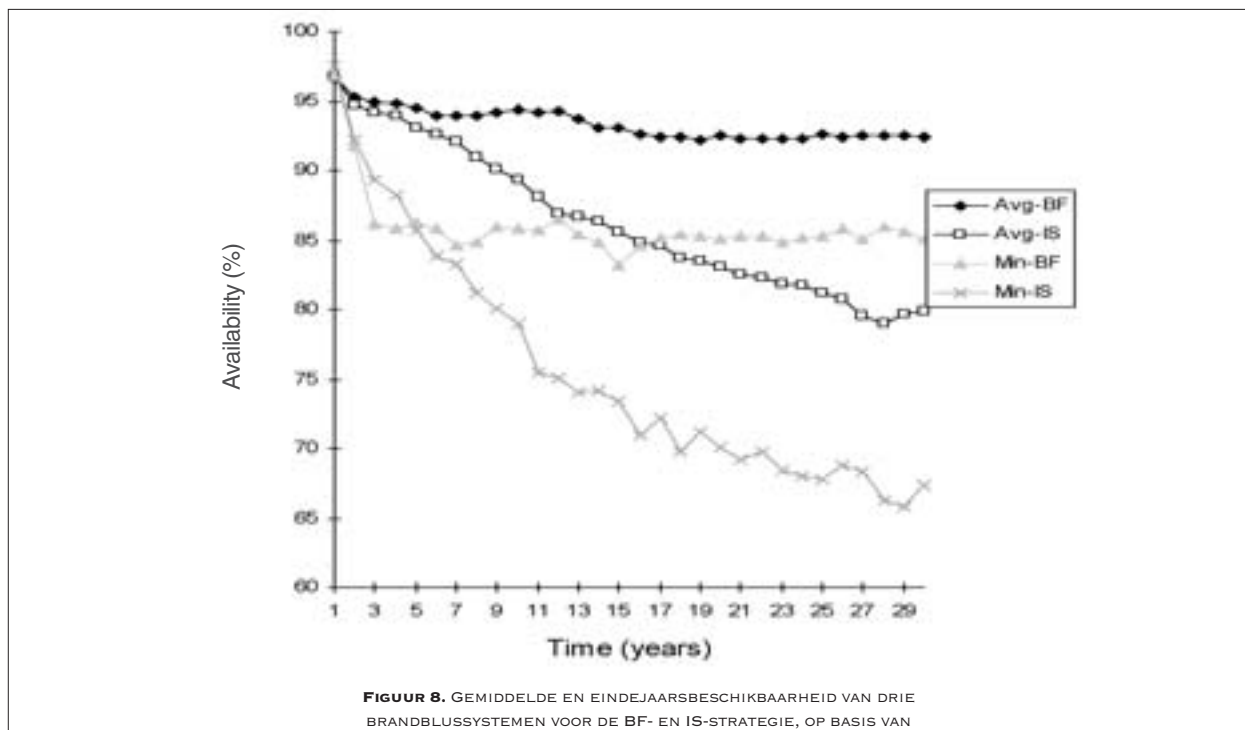
Op basis van het bovenstaande is een strategie ontwikkeld met de naam *Balanced Focus Strategy* (BF-strategie, refererend naar het zo veel mogelijk in balans brengen van de voorraden van de verschillende artikelen, waarbij die balans bepaald wordt door de allocaties behorende bij elk punt op de trade-off-curve). Deze strategie is vervolgens uitgetest op drie pompeenheden van het brandblussysteem dat eerder aan de orde is geweest, en vergeleken met een tweede strategie (*Immediately Spending Strategy*: IS-strategie) waarbij artikelen worden aangekocht zolang geld beschikbaar is. Het resultaat van deze vergelijking over een periode van dertig jaar wordt weergegeven in figuur 8 (Avg geeft de gemiddelde beschikbaarheid van de drie systemen gedurende het jaar weer; EoY duidt de beschikbaarheid aan het eind van het jaar aan). De resultaten zijn gegenereerd voor een budget dat 2 procent hoger ligt dan het gemiddeld benodigde budget.

Merk op dat we, ondanks het feit dat het herbevoorradingbudget op lange termijn voldoende zou moeten zijn, er toch niet in slagen een uitgangsbereikbaarheid te handhaven. Dit fenomeen is te wijten aan het feit dat in de praktijk onbalans optreedt tussen de voorraden van de verschillende artikelen. Dat laatste heeft met name gevolgen in die jaren waarin de budgetten uitgeput worden doordat het aantal steringen, resulterend in nieuwe aanschaf van artikelen, significant hoger is dan gemiddeld.

#### TEST VAN DE METHODIEK OP REAL-LIFE SYSTEMEN

De ontwikkelde methoden voor initiële bevoorrading en herbevoorrading zijn ten slotte onderworpen aan een uitgebreide *field test*. Voor dat doel zijn een drietal complexe systemen geanalyseerd, te weten een Kruisvaart-dieselmotorsysteem (KV Diesel), een radarsysteem voor luchtverdediging (LW08), en het Goalkeeper-systeem. Alleen artikelen met een prijs hoger dan f 75 zijn in de studie betrokken. Voor de KV Diesel, de LW08 en de Goalkeeper kwam dit neer op respectievelijk 259, 133 en 675 artikelen. De resultaten van een vergelijking van de huidige itembenadering met de systeemgerichte benadering worden weergegeven in tabel 5.

Uit de resultaten in deze tabel blijkt overduidelijk dat toepassing van een systeemgerichte benadering grote voordelen kan bieden. Voor de KV Diesel is de theoretisch berekende beschikbaarheid onder een itembenadering uitermate laag. Alhoewel in de praktijk de beschikbaarheid hoger is, werden de problemen met het dieselmotorsysteem volmondig door het betrokken marinepersoneel erkend; de in de praktijk resulterende hogere beschikbaarheid is dan ook mede een gevolg van een groot vermogen tot improviseren. Duidelijk is ook dat onder de systeembenadering een bevredigende beschikbaarheid kan



**FIGUUR 8.** GEMIDDELTE EN EINDEJAARSBESCHIKBAARHEID VAN DRIE BRANDBLUSSYSTEMEN VOOR DE BF- EN IS-STRATEGIE, OP BASIS VAN EEN HERBEVOORRADINGSBUDGET DAT 2 PROCENT BOVEN HET GEMIDDELD BENODIGDE HERBEVOORRADINGSBUDGET LIGT

worden bereikt zonder noodverbanden, maar met een significant lager investeringsniveau. Ook dit bevestigde het beeld dat vaak de juiste onderdelen niet op voorraad bleken te liggen, terwijl van andere onderdelen de voorraden aantoonbaar te hoog waren.

Voor de LW08 en de Goalkeeper, alhoewel minder extreem, rijst hetzelfde beeld op. Voor de eerste geldt dat ruwweg hetzelfde beschikbaarheidsniveau kan worden gerealiseerd, maar met aanzienlijke besparingen op de voorraden, terwijl voor de Goalkeeper (verreweg het kostbaarste systeem) een lichte reductie in voorraden kan worden bereikt, met een sterk verbeterde beschikbaarheid.

Ten slotte worden in figuur 9 de resultaten weergegeven van een vergelijking tussen de BF-strategie en de IS-strategie voor het dieselsysteem. Opnieuw worden zowel de gemiddelde beschikbaarheid als de minimale beschikbaarheid per jaar gegeven over een periode van dertig jaar, voor een situatie waarin het jaarlijks beschikbaar gestelde budget 2 procent hoger ligt dan het gemiddeld beschikbare budget. Opnieuw blijkt

de BF-strategie aanzienlijk beter te presteren dan de IS-strategie. Beide strategieën presteren echter iets minder goed dan in het voorbeeld in de vorige paragraaf. Dit is met name te wijten aan de veel grotere variatie in de vraag naar onderdelen van het dieselsysteem.

**SAMENVATTING EN CONCLUSIES**

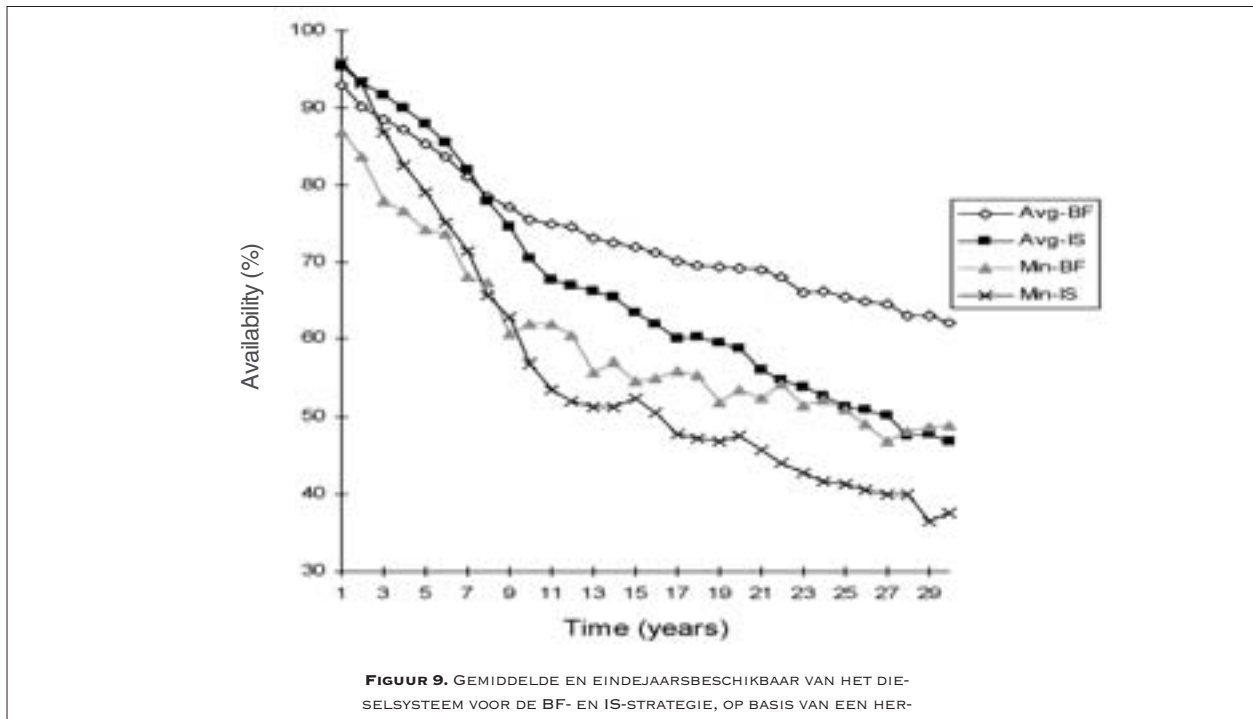
In dit artikel worden methoden ontwikkeld voor het voorraadbeheer van producten en reservedelen bij de Koninklijke Nederlandse Marine, met het doel een zo hoog mogelijke beschikbaarheid van de systemen waarin deze producten en onderdelen voorkomen te realiseren, binnen gegeven budgettaire kaders. Zowel de initiële als de exploitatiebevoorrading komen aan de orde. Voor beide wordt een systeemgerichte benadering van het spare parts managementprobleem uitgewerkt. De ontwikkelde methoden zijn vervolgens getest op een aantal bij de KM in gebruik zijnde reële systemen.

Uit de resultaten van de field tests blijkt overduidelijk dat een systeemgerichte benadering grote voordelen kan bieden, in termen van een verbeterde systeembeschikbaarheid onder gelijktijdige reductie van de investeringen in spare parts en producten. De optredende financiële verschillen zijn buitengewoon fors en suggereren bij extrapolatie zeer forse besparingen, en tegelijkertijd een sterk verhoogde beschikbaarheid in vergelijking met de huidige praktijk.

In het bestek van dit artikel is niet ingegaan op de details

**TABEL 5.** BESCHIKBAARHEID ONDER EEN ITEM-BENADERING EN EEN SYSTEEM-BENADERING

	KV Diesel		LW08		Goalkeeper	
	Old	New	Old	New	Old	New
Investment (Mfl)	6.9	2.1	25.9	10.4	112.1	102.2
Availability (%)	11.2	92.0	88.9	90.6	56.2	90.2



**FIGUUR 9.** GEMIDDELDE EN EINDEJAARSBESCHIKBAAR VAN HET DIESELSYSTEEM VOOR DE BF- EN IS-STRATEGIE, OP BASIS VAN EEN HERBEVOORRADINGSBUDGET DAT 2 PROCENT BOVEN HET GEMIDDELD BENODIGDE HERBEVOORRADINGSBUDGET LIGT

van de algorithmiek voor een aantal complexe (multi-echelon, multi-indenture) situaties. Ook het vraagstuk van een adequate informatiestructuur (systeemconfiguraties, storingsgegevens en dergelijke) is buiten beschouwing gebleven. Het is duidelijk dat goede gegevensstructuren en informatiesystemen de basis vormen van een systeemgerichte werkwijze. De voordelen van de nieuwe werkwijze zijn echter zo evident dat investeringen in deze systemen alleszins gerechtvaardigd lijken. Daarnaast biedt een systeemgerichte werkwijze, naast de reeds aangevoerde voordelen, ook mogelijkheden om zogenoemde *cost drivers* en *availability killers* te kunnen detecteren en om gevoeligheidsanalyses uit te kunnen voeren (Rustenburg, 2000). Samengevat: invoering van een systeemgerichte benadering vergt het nodige aan investeringen in een adequate informatie-infrastructuur, en daarnaast de discipline een veelheid van statische en dynamische data te verzamelen en te onderhouden. De voordelen voor de Koninklijke Marine zijn echter zo groot dat een dergelijke investering gerechtvaardigd is. Derhalve zal het Marinebedrijf de nieuwe werkwijze dan ook integraal invoeren.

#### NOOT

1. Servicegraad betekent in dit verband beschikbaarheid of *fill rate*, dat wil zeggen de kans dat een gevraagd artikel onmiddellijk geleverd kan worden en dus voorradig is.

#### LITERATUUR

- Albright, S.C., 'An approximation to the stationary distribution of a multi-echelon repairable item inventory system with finite sources and repair channels', *Naval Research Logistics*, 9, p. 179-195, 1989.
- Avsar, Z.M. & W.H.M. Zijm, 'Resource-constrained two-echelon inventory models for repairable item systems', *Memorandum 1521* University of Twente, Faculty of Mathematical Sciences, submitted for publication, 2000.
- Díaz, A. & M.C. Fu, 'Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity', *European Journal of Operations Research*, 97, p. 480-492, 1973.
- Graves, S.C., 'A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment', *Management Science*, 31, p. 1247-1256, 1985.
- Muckstadt, J., 'A model for a multi-echelon, multi-indenture inventory system', *Management Science*, 20, p. 472-481, 1973.
- Rustenburg, W.D., *A system approach to budget-constrained spare parts management*, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 2000.
- Rustenburg, W.D., G.J. van Houtum & W.H.M. Zijm, 'Spare parts management at complex technology based organizations: an agenda for research', *The International Journal for Production Economics*, accepted for publication, 2000a.
- Rustenburg, W.D., G.J. van Houtum & W.H.M. Zijm, 'Spare parts management for complex technical systems: resupply of spares under limited budgets', *IIE Transactions*, accepted for publication, 2000b.
- Sherbrooke, C.C., 'METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control', *Operations Research*, 16, p. 122-141, 1968.
- Sherbrooke, C.C., VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models, *Operations Research*, 34, p. 311-319, 1986.

Sherbrooke, C.C., *Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques*, Wiley, New York 1992.

Silver, E.A., D.F. Pyke & R. Peterson, *Inventory management and production planning and scheduling*, Wiley, New York 1998.

Slay, F.M., *VARI-METRIC: an approach to modelling multi-echelon resupply when the demand process is poisson with a gamma prior*, Technical Report AF301-3, Logistics Management Institute, Washington 1984.