

Beslissingsondersteuning voor civiel onderhoud

gepubliceerd in:
Bedrijfskunde

jaargang 73, nummer 2, pag. 6-17, 2001

Auteurs: R. Dekker
J.M. van Noordwijk

ISBN 90-77051-08-2

Beslissingsondersteuning voor civiel onderhoud

Prof. Dr. ir. R. Dekker en Dr. ir. J.M. van Noortwijk¹

Samenvatting

In deze bijdrage bespreken we de rol van onderhoudsoptimalisatie en beslissingsondersteuning in onderhoudsmanagement. Na een algemene inleiding in onderhoudsmanagement theorie beschrijven we vier zelf uitgevoerde cases in civiel onderhoud en analyseren daarmee de voors en tegens van dit soort optimalisaties.

1. Inleiding

Onderhoudsmanagement lijkt altijd een stiefkindje te zijn geweest van de bedrijfskundewetenschap. Strategie, marketing, financiering en logistiek komen daarentegen over als hoofdrichtingen. Momenteel is er zelfs geen volledige leerstoel onderhoudsmanagement aan de Nederlandse universiteiten, terwijl die er wel in het verleden geweest is. Soortgelijke observaties lijken ook op te gaan voor bedrijven waar de eerdergenoemde hoofdrichtingen meestal in de directie zijn vertegenwoordigd, terwijl het hoofd onderhoud veelal een ondergeschikte rol heeft ten opzichte van de directeur bedrijfsvoering.

Dit beeld doet onrecht aan het belang van onderhoud. Hoewel het misschien minder glamour heeft dan andere richtingen, is het toch voor een groot aantal bedrijven en voor de overheid een hoofdzaak. Bij kapitaalintensieve bedrijven, zoals raffinaderijen, is de onderhoudsdienst vaak de één na grootste, zo niet grootste, qua mankracht. Ook qua uitgaven scoort onderhoud hoog. Bij vliegtuigen vormt onderhoud vaak zo'n 25% van de directe kosten (Air Transport World 7/1999, p. 149) en is vrijwel even belangrijk als de brandstofuitgaven, de kosten van de bemanning en de directe eigendomskosten. Bij rijkswegen geldt dat het jaarlijkse budget voor onderhoud al hoger is dan dat voor nieuwbouw. De beheersing van onderhoudskosten is echter vaak moeilijker dan die van de andere posten. Onderhoudskosten hebben de neiging sneller dan de inflatie te stijgen en er zijn weinig ondernemingen die er goed grip op hebben. In feite heeft onderhoud vergelijkbare problemen als de gezondheidszorg (in het engels passend "health maintenance" genoemd).

¹ Prof. Dr. ir. R. Dekker is hoogleraar Mathematische Besliskunde aan de Faculteit der Economische Wetenschappen van de Erasmus Universiteit Rotterdam. Dr. ir. J.M. van Noortwijk is adviseur risico en veiligheid bij het onderzoeks- en adviesbureau HKV [LIJN IN WATER](#). Beide onderzoekers zijn al geruime tijd bezig met optimalisatie van onderhoud, in het begin bij Shell Research en later bij de universiteit, c.q. HKV [LIJN IN WATER](#).

Er zijn diverse methoden binnen de bedrijfskunde ontwikkeld voor het beheersen van onderhoud. Enerzijds zijn er onderhoudsconcepten ontwikkeld (zie Gits, 1986 en Kelly, 1989), die het onderhoud structureren en een checklist opstellen over wanneer welk type onderhoud gedaan moet worden. Het voordeel van deze concepten is dat ze intuïtief en snel duidelijk zijn, het nadeel is echter het ontbreken van een validatie (bij een aantal detailsaspecten kan men vraagtekens zetten) en voorts geldt bij deze concepten dat ze een hoop zaken open laten; ze missen in feite een wetenschappelijke fundering. Bijvoorbeeld, Gits vraagt op een moment in zijn onderhoudsconcept of er een toestandsindicator is; zo ja dan moet men toestandsafhankelijk onderhoud doen, zoniet dan moet men een ander type onderhoud kiezen. Gits verwacht dat deze vraag direct beantwoord kan worden, echter hij definieert niet wat een toestandindicator is, noch geeft hij aan hoe het dan geëvalueerd moet worden. Het is onze mening dat sommige van deze vragen wel met kwantitatieve modellen beantwoord kunnen worden, hoe specifiek de situatie waarop dergelijke modellen direct toepasbaar zijn dan ook soms moge zijn. Zij geven immers formele, kwantificeerbare en dus duidelijker operationalisering van begrippen en leveren daarmee een fundamenteel wetenschappelijke bijdrage aan onder andere kostenvergelijkingen. Dat laat onverlet, dat het in de praktijk niet altijd lonend is om die route te volgen, omdat ze te kostbaar is en men met goed engineering judgement ook tot een vergelijkbaar resultaat kan komen.

Een andere aanpak van onderhoud is Reliability Centred Maintenance (zie Smith (1993)). In die aanpak wordt het onderhoud afgestemd op de bijdrage aan de bedrijfszekerheid (reliability) van systemen. Het is daarmee een top-down methode en enigszins vergelijkbaar met het concept van Gits. RCM is inmiddels verder uitgewerkt en inmiddels door vele consultants overgenomen. Diverse succesvolle toepassingen van RCM zijn inmiddels gemeld. Ook voor RCM gelden vergelijkbare bedenkingen: keuzes worden voornamelijk gebaseerd op engineering judgement en niet op basis van wetenschappelijke berekeningen (zie Rausand and Vatn (1997)). Het is daarmee in eerste instantie een kwalitatieve en niet een kwantitatieve methode met alle beperkingen vandie.

Tenslotte willen we in deze inleiding kort ingaan op de standaard budget trending. In veel gevallen, zoals bij gebouwen, maakt men trendanalyses op basis van historische uitgaven aan onderhoud. Men kan dat uitbreiden tot een vergelijkende studie tussen gebouwen en zo die gebouwen identificeren waarbij het minst aan onderhoud wordt uitgegeven. Het probleem is echter dat zulke analyses nooit antwoord geven of en waarom er systematisch teveel wordt uitgegeven. Hoewel in de praktijk de historische situatie vaak gebruikt wordt voor de toekomst, is dat toch een wetenschappelijk onbevredigende situatie.

We willen daarom in deze bijdrage ingaan op de waarde van optimalisatiemodellen voor onderhoudsmanagement, in het bijzonder van civiele constructies, omdat we daar ervaring mee hebben. Men dient daarbij te bedenken dat juist deze sector de grootste onderhoudsbedrijven in Nederland herbergt. Door de aard van de problematiek, zowel qua omvang als qua complexiteit, is het ook bedrijfskundig gezien een van de

interessantste gebieden van onderhoudsmanagement. Speciaal ook de interactie tussen de civiele techniek en het bedrijfsmatig handelen treedt daarbij op de voorgrond. We zullen nu eerst een overzicht geven van het onderhoud, daarna zullen we ingaan op informatievoorziening en beslissingsondersteuning. Voorts geven we een aantal voorbeelden. In de discussie zullen de voor- en nadelen behandeld worden.

2. Civiel onderhoud - karakteristieken

Civiele objecten kunnen in diverse categorieën worden onderverdeeld. Allereerst zijn er wegen (rijkswegen, provinciale wegen en stedelijke wegen), maar daarnaast zijn er ook civieltechnische kunstwerken en gebouwen. Kunstwerken kunnen weer onderscheiden worden in droge kunstwerken (zoals bruggen en viaducten) en natte kunstwerken (zoals sluisen, stuwen, stormvloedkeringen, dammen, bruggen en dijken). De totale kapitaalgoederenvoorraad aan civiele objecten in Nederland wordt geschat op honderden miljarden gulden. Kenmerkend voor civiele constructies is dat ze niet bewegen en daardoor relatief langzaam verouderen (we laten dan wel het werktuigkundig deel van een civiele constructie, zoals een bewegende brug, buiten beschouwing). Het verouderingsproces wordt voornamelijk bepaald door de weers- en omgevingsgesteldheid en dus niet zozeer door het gebruik. Hierdoor lijkt de variatie in veroudering minder te zijn dan bij werktuigkundige installaties. Ook geldt dat vrijwel al het onderhoud wordt uitbesteed, zodat onderhoudskosten duidelijk zichtbaar zijn. Tussen de civiele objecten bestaan nog wel wat verschillen. Er is een veelheid aan wegen en hoewel er misschien plaatselijke – niet altijd grote – verschillen zijn tussen wegen, zijn er toch vier hoofdslijtagekenmerken aan te wijzen. Voor dijken geldt hetzelfde, zij het in wat mindere mate. Van kunstwerken en gebouwen daarentegen wordt beweerd dat er geen twee identieke zijn. Gebouwen hebben sowieso een complexe functie en veroudering bestaat daar ook uit het niet meer up-to-date zijn van een gebouw doordat de gebruikseisen zijn veranderd. Dit kan ook enigszins voor kunstwerken gelden (bijvoorbeeld een brug met te weinig capaciteit), maar in veel mindere mate. Daarbij veranderen de gebruikseisen bij bruggen nauwelijks.

Onderhoudsvormen

Het is gebruikelijk om onderhoud te definiëren als het geheel van activiteiten, waarmee de functionele kwaliteit van een onderdeel (of object) wordt teruggebracht tot het gewenste kwaliteitsniveau. Hierbij zijn inspecties, reparaties, vervangingen en levensduurverlengende maatregelen mogelijke onderhoudsacties. Door levensduurverlengend onderhoud kan veroudering worden vertraagd, waardoor het moment van falen wordt uitgesteld en waarmee dus de levensduur van een onderdeel wordt verlengd. Het vervangen van de coating van een sluisdeur valt in deze categorie (zie Bakker et al., 1999) evenals veel onderhoud bij gebouwen (zie sectie 3, 4^e voorbeeld). Cruciaal is de modellering van de veroudering om daaruit een faalmoment te voorspellen. Globaal zijn er twee typen onderhoud te onderscheiden, namelijk correctief onderhoud (ná falen) en preventief onderhoud (vóór falen). Hierbij zijn vaak twee manieren van falen te onderscheiden: normfalen en fysiek falen. Normfalen treedt op bij het overschrijden van een van tevoren vastgestelde faal- of veiligheidsnorm (het

gebruik kan dan veelal nog wel doorgaan). Fysiek falen treedt op bij het bezwijken of daadwerkelijk kapot gaan van een onderdeel (het gebruik moet dan ook stoppen). Bij werktuigkundige objecten kent men voornamelijk het laatste type falen, bij civieltechnische objecten het eerste. Preventief onderhoud is veelal te prefereren boven correctief onderhoud als de gevolgeffecten van falen groot zijn (qua kosten of veiligheid). Dit is ook aan de orde in voorbeeld 1 van sectie 4, dat het baggeren van een rivierbodem beschrijft. Bij normfalen is er weinig verschil in kosten tussen preventief en correctief onderhoud (eigenlijk is er weinig verschil tussen de twee dan), omdat er dan geen directe consequenties zijn. Dit is het geval bij het gebouwen onderhoud uit voorbeeld 4 van sectie 4. Onderhoud wordt dan gedreven door de wens de systemen in bepaalde kwaliteitsniveaus te houden. Hieronder zullen we een aantal vormen van preventief onderhoud bediscussiëren.

Preventief onderhoud

Preventief onderhoud kan worden onderverdeeld in tijds-, gebruiks-, belastings-, gelegenheds- en toestandsafhankelijk preventief onderhoud. Tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd na een vaste tijdsperiode, gebruiksduur of belasting, zoals het verversen van olie bij elke 15.000 km-beurt van een auto. Het voordeel hiervan is de planbaarheid, het nadeel is dat het soms lang voordat er echt storingen zijn wordt uitgevoerd. Gelegenheidspreventief onderhoud is preventief onderhoud dat uitgevoerd wordt wanneer een leeftijdsdrempel (tijd, gebruik of belasting) is overschreden en er zich een gelegenheid voordoet. Men denke hierbij aan een gebeurtenis waardoor het systeem enige tijd niet nodig is en dan kan worden onderhouden. Gelegenheidspreventief onderhoud is goedkoper dan gepland tijds- gebruiks- of belastingspreventief onderhoud, omdat geen stilstandkosten worden opgelopen. Het nadeel is echter dat dit soort onderhoud moeilijker planbaar is en dat men vrij snel moet reageren op een gelegenheid. Toestandsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd op basis van het inspecteren van de toestand of conditie van een onderdeel, zoals bij het inspecteren van de blokkenmatten van de Oosterscheldekering. Toestandsafhankelijk preventief onderhoud is veelal effectiever en goedkoper dan leeftijds- of gebruikspreventief onderhoud, afhankelijk van de voorspellende waarde van de toestandsindicator. Een nadeel kan de slechte planbaarheid zijn, als de indicator een korte waarschuwingstijd geeft. Een uiterst interessant facet bij toestandsafhankelijk preventief onderhoud is de te hanteren inspectiefrequentie. Hierop zal in voorbeeld 2 in sectie 4 dieper worden ingegaan. In het geval van toestandsafhankelijk preventief onderhoud kunnen zich drie mogelijkheden voordoen. Of er hoeft niets te worden gedaan omdat de conditie het preventieve interventieniveau nog niet heeft overschreden, of er moet preventief onderhoud worden uitgevoerd omdat de conditie wel het preventieve interventieniveau, maar nog niet het faalniveau, heeft overschreden, of er moet correctief onderhoud worden uitgevoerd als gevolg van falen omdat de conditie het fysiek- of normfaalniveau heeft bereikt. Preventieve interventieniveaus, -intervallen en/of inspectiefrequenties kunnen worden bepaald door een afweging op basis van risico's of totale kosten (zie voorbeeld 1 in sectie 4). Onderhoud tegen minimale kosten komt dan neer op het vinden van een optimale balans tussen de kosten van preventief onderhoud enerzijds en de kosten van correctief onderhoud anderzijds. Bij wegonderhoud is er nog een complicerende

factor: door meerdere wegsegmenten tegelijk te onderhouden kunnen de kosten daarbij verlaagd worden en de winst van preventief onderhoud zit hem vooral daarin. Het probleem is echter hoeveel segmenten mee te nemen (zie voorbeeld 3 van sectie 4). Wiskundige onderhoudsoptimalisatiemodellen kunnen hierbij van dienst zijn. Zo mogelijk kunnen toekomstige onderhoudskosten op basis van de reële rente (rente minus inflatie) in de vorm van de contante waarde worden gediscoteerd naar het huidige jaar (LevensCyclusAnalyse). Het verdisconteren van kosten is van groot belang bij het vergelijken van investeringsbeslissingen in het ontwerp met als doel om een optimale balans te vinden tussen de initiële bouwkosten enerzijds en de toekomstige onderhoudskosten anderzijds (bijvoorbeeld bij de keuze tussen aanleg van een houten of stalen brug). Kosten-optimale ontwerpbeslissingen kunnen ondermeer worden genomen met het model beschreven in voorbeeld 1.

Onzekerheid in veroudering en levensduur

Een complicerende factor bij het modelleren van onderhoud is dat het conditieverloop en dus het faaltijdstip of de levensduur onzeker zijn. Hoe de conditie van een onderdeel in de loop der tijd door veroudering achteruit gaat, is immers op voorhand niet te zeggen. Door de onzekerheid in de veroudering of de levensduur te modelleren met behulp van een kansverdeling, kunnen mogelijke variaties expliciet in een onderhoudsmodel worden verwerkt. Op basis van de onzekerheid in het verwachte verouderingsverloop kan worden uitgerekend hoe groot de kans op falen per jaar is, dat wil zeggen hoe groot de kans is dat de conditie in een bepaald jaar het faalniveau bereikt. Voorbeelden van stochastische veroudering zijn de aanslibbing van een rivierbodem (voorbeeld 1 van sectie 4) en de ontgrondingskuilontwikkeling (voorbeeld 2 van sectie 4) en de verslechtering van wegen (voorbeeld 3 van sectie 4). Een complicerend aspect bij de laatste is dat een systeem bestaat uit vele componenten (in dat geval wegsegmenten van 100 meter), waarbij er afhankelijkheden kunnen bestaan tussen de veroudering van de segmenten.

3. Informatievoorziening en beslissingsondersteuning

3.1 Informatievoorziening

Waar bij productiebedrijven Enterprise Resource Planning (ERP) systemen zoals SAP, Baan, Peoplesoft en Oracle brede toepassing hebben gevonden in productiebedrijven, is er in de civiele sector in het algemeen nauwelijks sprake van standaardisatie van informatiesystemen. Een uitzondering hierop zijn informatiesystemen voor gebouwen. Veelal maakt men gebruik van eigen ontwikkelde systemen. In de Verenigde Staten is tegenwoordig elke staat verplicht een Pavement Management Systeem voor wegenonderhoud te hebben en is er een zekere markt voor dit soort systemen ontstaan. In Europa is er echter per land een oplossing (in de landstaal) en is er dus weinig uitwisseling van informatiesystemen tussen landen. Zo is in Nederland het recent in opdracht van Rijkswaterstaat ontwikkelde TISBO (Technische InformatieSystemen Beheer en Onderhoud) een instrumentarium waarmee beheerders, uitvoerders en beleidsmakers informatie kunnen uitwisselen over het beheer en onderhoud van

kunstwerken, oevers en bodems. Een onderhoudsoptimalisatiemodule maakt hier deel van uit. Bij wegonderhoud worden in de IVON systemen informatie over de toestand van wegen bijgehouden. De Rijksgebouwendienst (voorbeeld 4 van sectie 4) hanteert een uniform inspectieschema voor alle gebouwen en slaat daar ook alle gegevens in op. Een probleem is echter dat er soms meerdere databases zijn voor dezelfde objecten en dat ze informatie niet altijd op dezelfde manier opslaan. Zo is er in IVON jaarlijkse informatie over de toestand van elk wegsegment (van 100 meter) van alle rijkswegen. De informatie over de gepleegde onderhoudsacties wordt echter niet per wegsegment bijgehouden, maar per project wat veelal veel grotere stukken betreft. Hierdoor wordt een statistische analyse van de verouderingsprocessen bemoeilijkt.

Het nadeel van al deze unieke informatiesystemen realiseert men zich pas als men de effecten van ERP-systemen in productiebedrijven bekijkt. Omdat er inmiddels duizenden implementaties van bijvoorbeeld SAP zijn, heeft het zijn gekregen speciale planningssoftware hiervoor te ontwerpen (de zgn. Advanced Planning Systemen (zie Chopra and Meindl 2001). Door de veel grotere markt kan men dan veel makkelijker de investeringen in geavanceerde software terugverdienen.

3.2 Type beslissingen

Meestal maakt men bij beslissingen een onderscheid naar planningshorizon en onderscheid men strategische, tactische en operationele problemen. Ten aanzien van onderhoud willen we een extra categorie onderscheiden, nl. de ontwerpbeslissing. Die is namelijk van fundamenteel belang voor onderhoud.

- Bij de ontwerpbeslissing of de specificatie van een object dient het totale onderhoud over de verwachte levensduur alsmede de ontmantelingskosten aan het einde daarvan meegenomen te worden. De analyse hiervan wordt LevensCyclusAnalyse (LCA) genoemd. Veelal wordt gezegd dat 80% of meer van het onderhoud wordt vastgelegd door de keuze voor een bepaald systeem. Voor civiele objecten ziet men dit heel duidelijk terug in de keuze van materialen en de manier waarop constructies worden uitgevoerd.
- De strategische beslissingen (na aanschaf van het object) betreffen de specificatie van het onderhoudsconcept alsmede afstemming tussen onderhoud en het gebruik, de beslissing zelf onderhoud te doen of het uit te besteden en tenslotte de omvang van het budget.
- Tactische beslissingen zijn de planning van groot onderhoud, de allocatie van budgetten over meerdere objecten, het selecteren of prioriteren van projecten en de bepaling van de benodigde onderhoudscapaciteit
- Tenslotte gaan de operationele beslissingen over het afstemmen van de onderhoudsuitvoering en het gebruik, het prioriteren van uitstaand onderhoud en scheduling van onderhoudsmankracht

Voor elk van deze problemen zijn modellen voor beslissingsondersteuning ontwikkeld. De meeste richten zich echter op het onderhoudsconcept op een vrij laag niveau in een systeem (bijvoorbeeld een component). Dit heeft als voordeel dat het overzichtelijk is, maar als nadeel dat de kostenbesparing niet zo groot is. Voorbeeld 3 van sectie 4 richt zich op een vergelijking van onderhoudsconcepten, voorbeeld

3.3 Overzicht onderhoudsoptimalisatiemodellen

Onderhoudsoptimalisatiemodellen zijn wiskundige modellen die de kosten en baten van diverse onderhoudsstrategieën kwantificeren en een advies geven over welk onderhoud de kosten minimaliseert, daarbij rekening houdend met gebruikseisen. Hoewel er ook enige simpele handmatige optimalisaties zijn, heeft het merendeel van de modellen een computer nodig om uitgevoerd te worden. Het meest bekend zijn de modellen die voor een enkele component / eenheid de optimale frequentie van vervanging bepalen (de leeftijds- of blokvervangingsmodellen).

Kenmerkend voor de grootste groep optimalisatiemodellen is een kwantitatieve modellering van de veroudering, het liefst in de vorm van een voorspelling over de tijd tot falen. Daarbij hebben deze modellen kostengegevens nodig, veelal over een preventieve vervanging en een vervanging bij falen om tot een goede afweging tussen beide te kunnen komen. De resterende groep modellen ziet de onderhoudsstrategie als een gegeven en probeert het zo goed mogelijk in te passen in het gebruik (bijvoorbeeld het onderhoud aan vliegtuigen en van treinen binnen een vaste dienstregeling).

Naast het optimaliseren van gepland preventief onderhoud zijn er ook modellen die zich bezig houden met inspectieschema's en met gelegenheidsonderhoud. De eerste welbekende onderhoudsoptimalisatie modellen werden gepubliceerd in de zestiger jaren door Barlow & Proschan (1965) en McCall (1965). Daarna zijn er veel publicaties verschenen, maar helaas niet alle even bruikbaar. Vermeldenswaard is overigens het zogenoemde "delay time model", ontwikkeld op de Universiteit van Salford (UK) door Christer en anderen (zie Baker en Christer (1994)). Door het schatten van de vertraging (delay time) tussen het eerste observeerbare schadekenmerk en werkelijk falen, berekent dit model hoe vaak er inspecties gedaan moeten worden om falen te voorkomen. Dit model is vele keren succesvol toegepast.

Een aparte tak binnen de onderhoudsoptimalisatie houdt zich bezig met de coordinatie tussen onderhoud. Door onderhoud tegelijk aan meerdere componenten uit te voeren kunnen kostenreducties behaald worden. Dit is speciaal het geval bij wegonderhoud (zie voorbeeld 3 van sectie 4). Een overzicht over dit soort modellen is te vinden in Dekker, Wildeman en Van der Duyn Schouten (1997).

3.4 Beslissingsondersteunende systemen

Beslissingsondersteunende systemen zijn belangrijke instrumenten om besluitvorming te ondersteunen. Ruwweg twee typen kunnen onderscheiden worden: speciale modules die gekoppeld zijn aan informatiesystemen om dagelijkse beslissingen te ondersteunen en aparte systemen die gebruikt worden om strategische vragen te ondersteunen. De eerste draaiden stevast op mid/mainframe systemen, de laatste op PC's. Tegenwoordig is er een combinatietrend zichtbaar. De beslissingsondersteunende systemen draaien op PC's of werkstations en hebben daarnaast een naadloze verbinding

met (diverse) informatiesystemen. De onderhoudswereld lijkt hierbij wat achter te lopen bij de productiewereld: hoewel er al diverse onderhoudsinformatiesystemen zijn en ook ERP pakketten als SAP onderhoudsmodules heeft met koppelingen naar reservedelenbeheer, zijn de beslissingsondersteunende faciliteiten nog beperkt tot analyse van opgeslagen gegevens en niet zozeer optimalisatie. Het probleem bij onderhoudsoptimalisatie is dat vooral informatie nodig is over wat er zou gebeuren als we het onderhoud op andere momenten zouden doen en daar zijn begrijpelijkerwijs geen historische gegevens over. Nu moet aan de andere kant ook opgemerkt worden dat beslissingsondersteunende systemen, zoals APS pas recent de productiewereld veroveren, terwijl een groot deel van de theorie al twintig jaar bekend is. Hieronder zullen we een kort overzicht geven van beslissingsondersteunende systemen voor civiel onderhoud.

In 1982 publiceerden Golabi, Kulkarni en Way een inmiddels klassiek artikel over een beslissingsondersteunend systeem voor snelwegonderhoud in Arizona. Dit gaf de aanzet tot de ontwikkeling van diverse informatie en beslissingsondersteunende systemen voor wegonderhoud. Een recent artikel van Wang & Zaniewski (1996) schets de successen van optimalisaties op dit gebied. Recent is een vergelijkbaar beslissingsondersteunend systeem ontwikkeld voor bruggen: PONTIS (zie Golabi & Shepard 1997). Men zou kunnen zeggen dat de achterstand in onderhoud in de publieke sector in de Verenigde Staten de ontwikkeling van dit soort systemen bespoedigd heeft, maar aan de andere kant kan men ook stellen dat daardoor nogal wat schaalvoordelen te behalen zijn bij het ontwikkelen van dit soort systemen.

In Nederland worden voor wegonderhoud diverse systemen gebruikt door de adviesafdeling DWW van het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Allereerst wordt er op een hoog niveau een meerjarenplanning gemaakt en wordt groot onderhoud / verbeteringen geprioriteerd via aan IVON gekoppelde systemen. Hierbij wordt optimalisatie alleen in beperkte mate toegepast. Vervolgens is er een systeem dat voor de kortetermijn advies geeft over onderhoud op wegniveau. Tenslotte zijn er ook optimalisatiestudies gedaan voor het uitvoeren van onderhoud op het niveau van een stuk weg van 100 meter (zie Timmer et al. 1993). Een strategische studie over een nieuw concept voor uitvoering wordt in dit artikel besproken in sectie 4.3. Voor onderhoud aan natte kunstwerken verwijzen wij naar secties 4.1 en 4.2. Voor gebouwenonderhoud (zie sectie 4.4) bestaat nog geen speciaal beslissingsondersteunend systeem gebaseerd op onderhoudsoptimalisatiemodellen. Wel worden kosten projecties en prioriteringen gemaakt

4. Voorbeelden van beslissingsondersteuning

In deze sectie zullen we een aantal voorbeelden van beslissingsondersteuning geven.

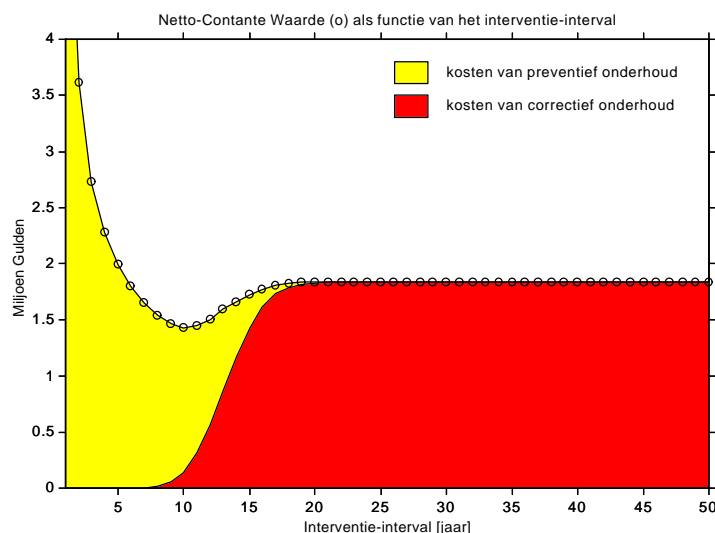
Voorbeeld 1: beheer en onderhoud natte infrastructuur

Vanwege de toenemende omvang van de Nederlandse infrastructuur wordt de aandacht voor het beheer en onderhoud hiervan steeds belangrijker. Rijkswaterstaat is zodoende

sinds enkele jaren bezig met het invoeren van een nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie met als uitgangspunt het centraal stellen van de gebruiksfuncties van de infrastructuur. Vanuit deze gebruiksfuncties worden de eisen waaraan de infrastructuur moet voldoen opgesteld.

De vertaling van beleid naar maatregelen gebeurt volgens een logische systematiek, het zogenoemde 10-stappenplan. Uitgangspunt zijn de verschillende functies die de natte infrastructuur vervult: hoofdtransportas, hoofdvaarweg, ecologie en waterkwaliteit, waterkeren, waterafvoer en recreatie. Het beheersgebied is van grof naar fijn opgedeeld in functioneel samenhangende watersystemen (bijvoorbeeld de Waal), watersysteem-delen (Lobith - Nijmegen) en objecten (een sluis of een oevervak). Per functie wordt het streefbeeld aangegeven, het na te streven kwaliteitsniveau. Streefbeelden zijn een toegekende vaarwegklasse, een af te voeren hoeveelheid water, een gewenste flora en fauna. Deze streefbeelden worden geconcretiseerd in functie-eisen, zoals een minimale vaardiepte of een maatgevende ontwerpwaterstand.

Als de functie-eisen bekend zijn dan kunnen deze eisen vergeleken worden met de daadwerkelijke situatie. Betreft het nieuwe of zwaardere functie-eisen dan moet men nieuwbouw- of verbetermaatregelen opstellen om aan de veranderde eisen te gaan voldoen. Verbetermaatregelen zijn het verlagen van de drempeldiepte van een sluis of het ophogen van een dijk. Betreft het functie-eisen waaraan al voldaan wordt dan moet men instandhoudings- en onderhoudsmaatregelen formuleren om op termijn aan de eisen te kunnen blijven voldoen. Het periodiek coaten van een sluisdeur en het weer op diepte baggeren van een deel van de rivier zijn zulke maatregelen.



Figuur 1: Verwachte gedisconteerde kosten van preventief en correctief baggeren van een rivierbodem.

Instandhouding betekent dat bepaald dient te worden welke onderhoudsmaatregelen gepleegd moeten worden en wanneer. Als eerste wordt bekeken welke onderdelen van een object kritiek zijn voor het functioneren ervan. Bij het beantwoorden van de vraag

wanneer het onderhoud plaats zal moeten vinden, speelt het bepalen van de juiste conditie- of inspectieparameter een belangrijke rol. Voor de onderhoudsmaatregel coaten van een sluisdeur zullen dit de resterende coatingdikte en het roestpercentage zijn. Voor omvangrijke civieltechnische kunstwerken zoals sluisen worden de instandhoudingmaatregelen en de bijbehorende inspecties per onderdeel uiteindelijk gebundeld tot een onderhouds- en inspectieplan voor het betreffende kunstwerk. Mede op basis van deze plannen nemen de tien regionale directies van Rijkswaterstaat jaarlijks hun onderbouwde pakket aan maatregelen op in hun regionale BeheerPlan Nat (BPN). Vervolgens kan op basis hiervan, na gezamenlijke prioritering, het overkoepelende landelijke BPN worden opgesteld, inclusief het voorstel voor de begroting.

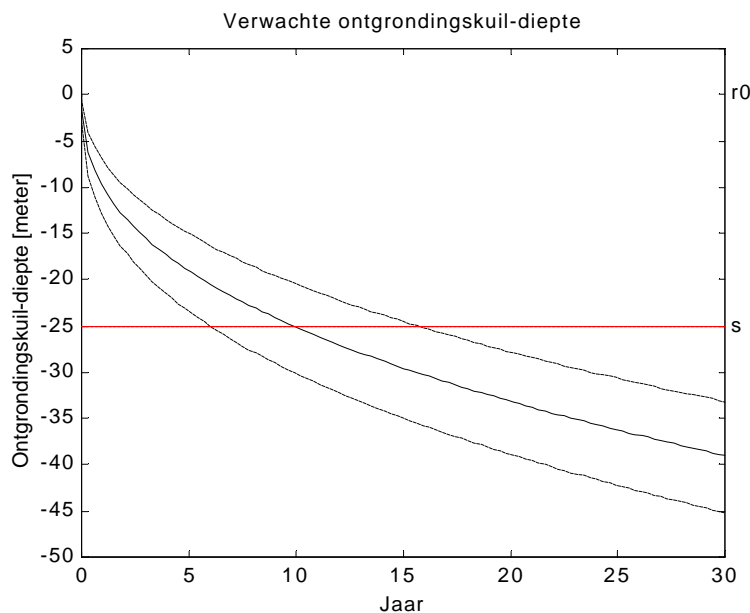
Op basis van de onzekerheden in de veroudering en/of het faaltijdstip kan een onderhoudsmodel worden gebruikt voor het bepalen van preventieve interventieniveaus en -intervallen. Een voorbeeld van zo'n model is het vaak toegepaste leeftijdsvervangingsmodel (Barlow & Proschan (1965) en van Noortwijk (1998)). Op basis van het criterium van de verwachte gediscoteerde kosten kunnen de kosten van preventief vervangen worden afgewogen tegen de kosten van correctief vervangen. In wezen geldt: hoe kleiner het preventieve onderhoudsinterval, des te lager de kosten van correctief vervangen, maar des te hoger de kosten van preventief vervangen.

Een illustratief voorbeeld van een onderhoudsprobleem is weergegeven in figuur 1 ontleend aan Ariëns & van Noortwijk (1998). Het betreft het baggeren van een rivierbodem in de voorhaven van een sluisencomplex. De belangrijkste functie van deze rivierbodem is de functie hoofdtransportas (scheepvaart). De bodem voldoet aan deze functie als het bodemniveau zodanig diep is, dat de scheepvaart niet wordt belemmerd (streefbeeld). Indien niet meer aan de functie-eisen wordt voldaan, moet er worden gebaggerd. Aangezien de aanslibbing de grootste bron van onzekerheid is, is het aanslibbingsproces gemodelleerd door middel van een kansverdeling. Gebruikmakend van deze kansverdeling is het verwachte faaltijdstip circa 15 jaar. De kosten van correctief baggeren zijn circa tweemaal zo groot als de kosten van preventief baggeren. De verwachte gediscoteerde baggerkosten zijn berekend op basis van een discontovoet van 5% en zijn minimaal voor een preventief interventie-interval van 10 jaar. Op basis van dit interval kan bij benadering ook een preventief interventieniveau worden bepaald. De zo verkregen onderhoudsbeslissing betreft een optimale afweging tussen de kosten van preventief baggeren enerzijds en de kosten van correctief baggeren anderzijds. Meer informatie over het beheer en onderhoud van de natte infrastructuur is te vinden in Ariëns & van Noortwijk (1998), Jorissen & van Noortwijk (1998) en van Noortwijk (1998). Het hierboven beschreven onderhoudsmodel maakt ook deel uit van TISBO. Het kan ook worden gebruikt voor het bepalen van een kostenoptimaal ontwerp.

Voorbeeld 2: inspectie blokkenmatten Oosterscheldekering

De blokkenmatten van de Oosterscheldekering moeten regelmatig worden geïnspecteerd op het ontstaan van ontgrondingskuilen. Met behulp van een inspectiemodel is het mogelijk om een optimale inspectiefrequentie te bepalen, waarvoor de verwachte

kosten van inspecteren en bestorten van ontgrondingskuilen minimaal zijn en waarvoor de veiligheid van de kering gewaarborgd is.

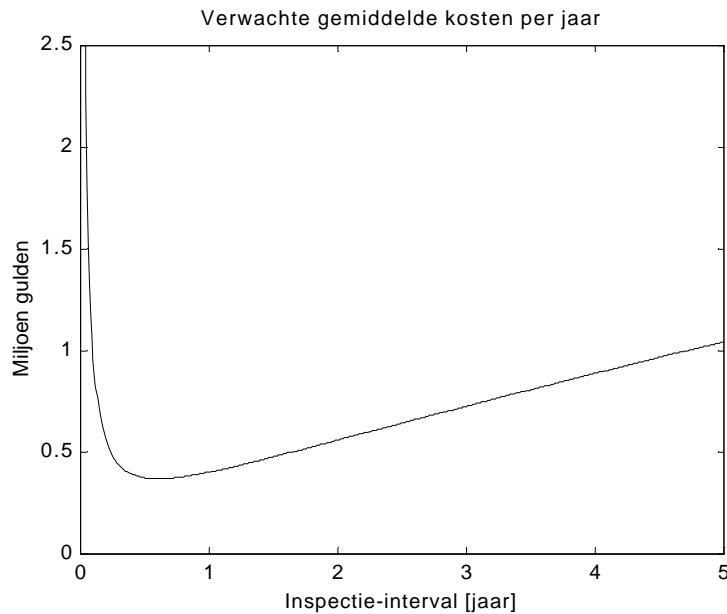


Figuur 2: Stochastisch proces van ontgrondingskuilontwikkeling.

De blokkenmatten bevinden zich aan weerszijde van de kering en hebben als doel de geotechnische stabiliteit van de kering te waarborgen door ontgroning te voorkomen. De blokkenmatten kunnen echter zodanig worden beschadigd, dat er toch zand wegspoelt en er ontgrondingskuilen ontstaan. Er moet dan ook regelmatig worden geïnspecteerd door middel van peilingen en SONAR-metingen.

Het bepalen van een kosten-optimale inspectiefrequentie komt neer op het vinden van een optimale balans tussen de kosten van inspectie enerzijds en de kosten van het bestorten van ontgrondingskuilen anderzijds. Hoe groter immers de inspectiefrequentie, des te eerder kunnen ontgrondingskuilen worden gedetecteerd en des te lager zijn de verwachte bestortingskosten, maar des te hoger zijn de inspectiekosten.

Voor het bepalen van een veilige en kosten-optimale inspectiefrequentie is door van Noortwijk & Klatter (1999) een wiskundig model ontwikkeld. Dit inspectiemodel houdt rekening met de onzekerheden in zowel de frequentie van het ontstaan van ontgrondingskuilen als de snelheid waarmee een ontgrondingskuil zich ontwikkelt (zie figuur 2). Vanuit het oogpunt van veiligheid mag een ontgrondingskuil niet dieper zijn dan de zogeheten faalgrens van 25 meter. De kans op het ontstaan van zo'n te diepe ontgrondingskuil in een bepaald tijdsinterval kan met behulp van het inspectiemodel worden uitgerekend en moet kleiner zijn dan de faalkansnorm.



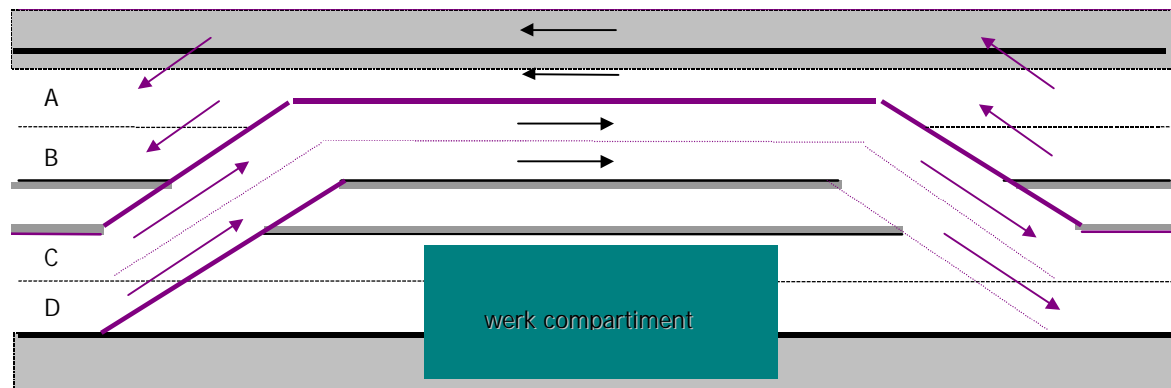
Figuur 3: Verwachte gemiddelde inspectie- en bestortingskosten.

Volgens het inspectiemodel zijn de verwachte gemiddelde inspectie- en bestortingskosten per jaar minimaal voor een interval van circa een half jaar (zie figuur 3). Mede op basis van dit resultaat heeft de beheerder van de Oosterscheldekering de inspectiefrequentie inmiddels verlaagd van vier maal per jaar naar twee maal per jaar.

Voorbeeld 3: optimalisatie van wegonderhoud bij Rijkswaterstaat

Onderhoud aan wegen is een vervelende oorzaak van files. Vandaar dat veel onderhoud aan wegen al 's nachts wordt uitgevoerd. Dat levert echter niet de meest ideale omstandigheden op. Aan de andere kant is het een flexibele vorm van onderhoud: kleine stukken weg kunnen precies op de momenten dat het nodig is onderhouden worden, volgens de regels van toestandsafhankelijk onderhoud. Alle wegen worden daarbij opgedeeld in segmenten van 100 meter waarvan jaarlijks middels een speciale meetauto de slijtage wordt bepaald. Dat gebeurt op basis van vier kenmerken: langsonvlakheid, dwarsonvlakheid, rafeling en krakelee. Nachtelijk onderhoud betekent echter wel dat een weg vaak afgesloten moet worden voor dit onderhoud. Kort geleden overwoog Rijkswaterstaat daarom een andere vorm van onderhoud waarin grote wegvakken, zeg van een knooppunt tot een volgend knooppunt in één keer opgelapt worden en het verkeer via permanente wegbarriers over de andere rijstrook geleid wordt (zie figuur 4). Dit onderhoud wordt daarom van-knoop-tot-knoop genoemd. Hierdoor zouden grotere schaalvoordelen behaald kunnen worden. Een weg (of delen daarvan) zou minder vaak afgesloten hoeven te worden en andere wegwerkzaamheden (onderhoud van lampen en vangrails) meegenomen kunnen worden. Ook zou dit veiliger zijn voor de wegwerkers. De vraag was echter of deze voordelen opwegen tegen de nadelen, omdat het toegepaste type onderhoud – collectieve vervanging – voor één component in het algemeen minder goed is

dan individueel toestandsafhankelijk onderhoud. Voor meerdere componenten kan deze vergelijking echter anders uitvallen.



Figuur 4: 4-0 wegbarrier systeem

Door het adviesbureau Oranjewoud was al een globale vergelijking tussen beide typen onderhoud gemaakt en later is die vergelijking middels een kwantitatief model uitgevoerd (zie Dekker, Plasmeijer en Swart (1998)). Allereerst werd daarbij veel tijd gestoken in het modelleren en kwantificering van veroudering van wegdelen. Een groot simulatiemodel is opgesteld waarin diverse onderhoudsplanningsmethoden werden uitgetest, aan de ene kant om acties voor verschillende schadekenmerken te combineren en aan de andere kant om onderhoud van verschillende wegsegmenten op elkaar af te stemmen. Het algehele probleem bleek veel complexer te zijn dan wat al binnen de literatuur bekend was. Binnen het model werden met zoektechnieken diverse parameters geoptimaliseerd (bijvoorbeeld naar het preventief onderhoudsniveau). Uit dit onderzoek bleek dat ook bij het van-knoop-tot-knoop onderhoud zo nu en dan klein onderhoud nodig is, omdat de veroudering sterk per wegsegment kan variëren. Ook bleek de correlatie tussen veroudering van aangrenzende weghelften nogal belangrijk te zijn: een aspect dat bij modelleren vaak over het hoofd gezien wordt. Het nieuwe type onderhoud bleek in de meeste gevallen aantrekkelijker, zowel qua kosten als gemiddelde wegkwaliteit, behalve als een weg intensief gebruikt wordt omdat een verkeersomleiding toch de wegcapaciteit iets vermindert en daardoor files veroorzaakt vooral op die uren van de dag dat er veel verkeer is. Het traditionele onderhoud geeft namelijk voornamelijk 's nachts files. Overigens zou men in ploegendienst moeten werken om de duur van de wegafzetting beperkt te houden. Voorbeelden van de uitkomsten worden gegeven in de volgende tabellen. Uit deze tabellen blijkt ook direct de kracht van optimalisatie: een kwantificatie van kosten afhankelijk van de wegintensiteit.

Tabel 1: lange termijn onderhouds en file kosten per jaar, voor Zeer Open Asfalt Beton

Verkeers Intensiteit	Traditioneel onderhoud		Met van knoop-tot-knoop onderhoud	
	2-1 systeem		3-1 systeem	4-0 systeem
≤ 40.000 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 707.000	DFL 703.000
42.500 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 741.000	DFL 703.000
45.000 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 930.000	DFL 703.000
47.500 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 1.426.000	DFL 746.000
50.000 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 2.312.000	DFL 1.048.000
52.500 v/w per 44 uur	DFL 714.000		DFL 4.115.000	DFL 1.754.000
55.000 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 8.637.000	DFL 2.969.000
57.500 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 14.561.000	DFL 4.622.000
60.000 v/w per 24 uur	DFL 714.000		DFL 22.427.000	DFL 9.511.000

v/w = voertuigen per weg; beide weghelften zijn 12.5 meter breed.

Tabel 2: geadviseerde onderhoudsstrategie voor een 2x2-rijksweg met een wegbreedte van 12.5 m.

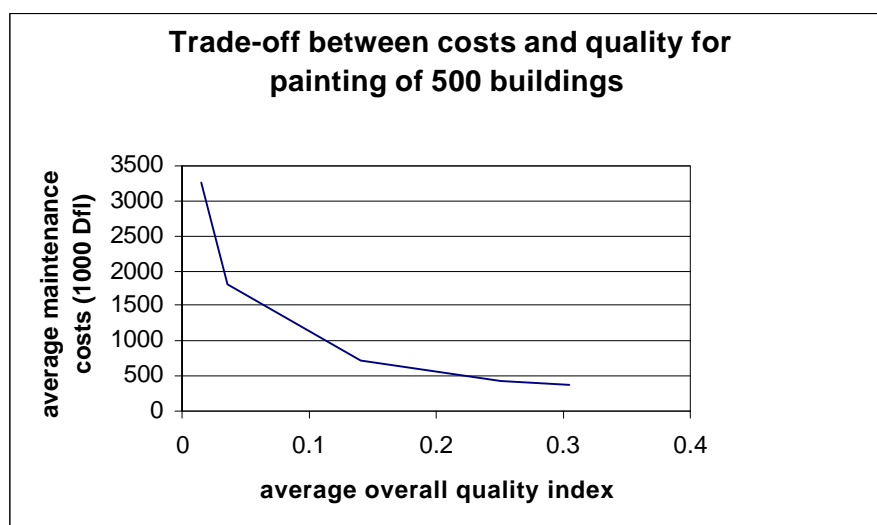
Verkeers Intensiteit	Knoop-tot- knoop on onderhoud	Weg afzetting	Economische baten*) dicht asfaltbeton wegen	Economische baten*) ZOAB wegen
≤ 45,000 v/w per 24 uur	Ja	4-0	9.5%	1.6%
> 45,000 v/w per 24 uur	nee	Traditio- neel	0.0%	0.0%

(*): met betrekking tot huidig onderhoud.

Voorbeeld 4: gebouwen onderhoud

Een tijdje terug is er een proefstudie gedaan naar rationalisatie van gebouwenonderhoud voor de Rijksgebouwendienst, cf Van Winden en Dekker (1998). De vraag was of er een uitspraak gedaan kon worden voor een groep van gebouwen hoeveel budget er nodig zou zijn voor onderhoud en welk kwaliteitsniveau daarmee bereikt kon worden. Dit laatste zou inzicht geven in de gevolgen van bezuinigen. Tot dusver was zo'n studie nog niet in de

literatuur beschreven. Voor een aantal gebouwdelen, zoals raamkozijnen, verfwerk, metsel- en voegwerk is een optimalisatie gedaan om de beste onderhoudsstrategie te bepalen. Dit is gedaan met discrete-tijds Markovbeslissingsketens. Het onderhoud werd daarbij gedreven door de kosten te minimaliseren om een bepaald gemiddeld kwaliteitsniveau te halen. Op basis daarvan werd voor elk bouwdeel middels de lineaire programmeringsmethode de beste onderhoudscyclus bepaald (in welk toestandsniveau dient welk type onderhoud gedaan te worden). Uitgaande van zes verschillende kwaliteitsniveaus werden verouderingssnelheden geschat alsmede de kosten van preservering in de verschillende toestandsniveau's. De balans tussen onderhoudskosten en kwaliteitsniveau voor verfwerk is daarbij in kaart gebracht. Het modelleren kostte nogal wat moeite omdat allerlei aspecten de toestandsruimte deden uitdijen. Ook bleek kostenverdiscontering met de bekende methoden niet te combineren met restricties op gemiddelde kwaliteiten. De resultaten zijn weergegeven in figuur 5.



Figuur 5.

Deze figuur laat heel goed zien wat kwantitatieve methoden kunnen: ze geven een voorspelling van de kosten benodigd om een ander (dan het huidige) kwaliteitsniveau te handhaven. Natuurlijk liggen er een aantal aannames hieraan ten grondslag, maar die kunnen expliciet gemaakt worden.

5. Discussie

Zoals op meerdere plaatsen in de samenleving te zien is, neemt de behoefte aan kwantitatieve onderbouwing van beslissingen toe. Dat komt enerzijds doordat er meer informatie en snellere computers beschikbaar zijn waar wat mee gedaan kan worden, maar anderzijds is er ook een steeds grotere druk om sneller goed onderbouwde beslissingen te nemen. De nieuwe generatie managers accepteert steeds minder dat beslissingen alleen op basis van ervaringen worden genomen. Op diverse plekken ziet men dat dagelijkse beslissers als planners en voorraadanalisten, vervangen worden door een kleiner aantal

hoog opgeleide beslissers die door beslissingsondersteunende systemen geholpen worden.

Het voorgaande betekent niet direkt dat dit overal zal gebeuren en het is daarom interessant om te analyseren waar en hoe. We zullen daartoe de voors en tegens van onderhoudsoptimalisatiemodellen in het algemeen op een rijtje zetten. Nog niet zo lang geleden zijn namelijk overzichten gemaakt van de stand van zaken met betrekking tot de toepassing van dit soort modellen (zie Dekker (1996) en Dekker & Scarf (1998)). Daarna zullen we de specifieke situatie van civiel onderhoud toelichten.

Voordelen

Onderhoudsmodellen

- geven kwantitatief inzicht in de relatie tussen kosten en baten van onderhoud en leggen daarmee de link tussen economie en bedrijfszekerheid (en /of efficiëntie),
- laten toe verschillende alternatieven met elkaar te vergelijken en verminderen daarmee conflicten tussen verschillende partijen,
- leveren normatieve en verifieerbare uitspraken op,
- maken zogenaemde "what if" analyses mogelijk.

Zoals in veel situaties levert kwantitatief modelleren inzicht op omdat nu eens niet vaag over zaken wordt gesproken, maar met cijfers. Voorts wordt men gedwongen over bepaalde zaken na te denken (bijvoorbeeld kosten). Veelal hebben diverse partijen alleen oog voor waar ze zelf mee bezig zijn, bijvoorbeeld de uitvoering zelf en niet zozeer met het algehele belang. Via het vergelijken van alternatieven op een kwantitatieve manier kan men niet alleen een volgorde bepalen, maar ook uitrekenen hoe groot de verschillen zijn. In de praktijk (volgens interne communicatie over beslissingsondersteunende systemen bij Shell) blijken daarmee conflicten tussen partijen (bijvoorbeeld gebruikers en onderhouders) vermeden te kunnen worden, omdat beide partijen hun alternatieven kunnen doorrekenen en de uitkomsten kunnen vergelijken. Met normatief bedoelen we dat de uitspraak richting geeft over wat het beste is: een optimalisatie komt veelal met een eenduidig advies. De uitspraak is voorts verifieerbaar, omdat kan worden achterhaald waarom een bepaalde beslissing het beste is. Tenslotte kan men onzekerheid over bepaalde parameters verminderen door "what if" analyses te doen en zo meer vertrouwen krijgen in een beslissing.

Andere beslissingsmethodes zoals RCM hebben deze eigenschappen niet. Kortom, men kan eigenlijk beweren dat een optimalisatiemodel de enige wetenschappelijk verantwoorde manier is om beslissingen te nemen.

Nadelen

- Optimalisatie is ingewikkeld – een computer, softwarepakket en kennis daarvan zijn nodig; veelal lukt het alleen door een uitvoerige studie door experts
- Verlaging van onderhoudskosten kan vaak ook op een simpeler manier verkregen worden

- Verouderingsparameters benodigd in de modellen zijn moeilijk te krijgen en zijn niet aansprekend

Het eerste nadeel is zonder meer waar, zij het dat de maatschappij steeds meer gewend raakt aan computers en hun rol in besluitvorming. Wel is het zo dat software die alleen zo nu en dan gebruikt wordt (bijvoorbeeld voor de ondersteuning van strategische beslissingen) snel in de vergetelheid raakt. Uit diverse ervaringen bleek dat een centraal persoon in een bedrijf nodig was om die kennis te kunnen vasthouden en optimalisaties te kunnen stimuleren. We zien hierbij wel de opkomst van gespecialiseerde consultancy bedrijven die dergelijke optimalisaties aanbieden.

Het tweede punt geldt zeker als op een te laag niveau van een object geoptimaliseerd wordt (bijvoorbeeld bij een filter) zonder dat er daar veel duplicatie van is. Helaas lukt het alleen om modellen toe te passen als naar een welgedefinieerd probleem gekeken wordt en dat is vaak een specifieke component. Het nadeel van een wetenschappelijke methode is dat ze exact is en dat moeilijk wat met de hand kan worden gewoven om een grote lijn aan te geven. Men zou echter methoden kunnen ontwikkelen die snel inzicht geven of er meer of minder onderhoud kan geschieden.

Tenslotte is er het probleem van verouderingsparameters. Dat geldt zeker voor levensduurverdelingen van componenten. Als er een optimalisatie van preventief onderhoud geschiedt opdat storingen worden voorkomen dan is niet alleen een gemiddelde levensduur nodig, maar ook een mate van spreiding van de veroudering (de helling van de storingsgraadcurve als functie van de tijd). Gelukkig is dat bij bepaalde modellen, bijvoorbeeld het delay-time model, niet nodig. De problemen met statistische levensduurverdelingen zijn de volgende

- een levensduurverdeling veronderstelt dat er geen menselijke ingrepen in het proces worden gedaan en dat het begrip falen eenduidig gedefinieerd is. Helaas is falen dat nu juist niet: het kan op diverse manieren geïnterpreteerd worden en ook grijpt men vaak in voor het falen. Daarnaast is het zo, dat als er veel storingen zijn, men de oorzaak van deze storingen probeert te vinden en die dan wegneemt, waardoor er minder storingen in de toekomst op zullen treden. Dit betekent dat alleen situaties met een gering aantal storingen overblijven, hetgeen statistische problemen geeft als er niet voldoende duplicaties van het object zijn. Zelfs dan wordt dataanalyse bemoeilijkt door een veelal niet-adequate rapportage van onderhoud.
- omgevingskenmerken of de manier waarop een systeem gebruikt wordt, kunnen een sterke invloed hebben op het voorkomen van storingen. Voorbeelden zijn zandstormen in woestijnen of een zoutklimaat bij onze kust. Door dit aspect kan men helaas data van verschillende objecten niet samennemen in een statistische analyse.
- een levensduurverdeling is nu eenmaal niet een begrip wat leeft bij de gemiddelde onderhoudsman. Mensen kunnen wel vaak een schatting geven van een gemiddelde, maar een variantie is al veel moeilijker te schatten, vooral als een deel van de waarnemingen (dat wil zeggen storingen) weggenomen worden door preventief onderhoud.

Nu kunnen levensduurverdelingen ook via expert judgment verkregen worden. Dat is echter niet makkelijk, maar toch wel te doen (zie van Noortwijk et al. 1992 en Dekker 1996). Helaas is deze kennis niet overal bekend.

Vervolgens willen we ook de specifieke aspecten van de civiele sector belichten. Zoals al reeds eerder gezegd verlopen verouderingsprocessen van civiele objecten langzamer dan die van werktuigbouwkundige. Dit geeft meer tijd om beslissingen te onderbouwen.

Voorts geldt dat veel onderhoud wordt uitbesteed en ook dat vereist dat er beter wordt nagedacht over welk onderhoud er nu gedaan moet worden. Als de beheerder niet zelf het onderhoud doet maar het uitbesteedt (in tegenstelling tot zoveel onderhoudsdiensten in bedrijven), dan wordt hij/zij niet zovaak door urgente onderhoudsproblemen afgehouden om een lange-termijn analyse te maken. Daarnaast geldt dat er van sommige systemen veel duplicaties zijn, bijvoorbeeld van wegen, hetgeen een betere data-analyse mogelijk maakt en het probleem meer standaard maakt, waardoor de kosten van analyse sneller goedgemaakt kunnen worden door betere beslissingen. Het is daarom ook geen toeval dat in dit artikel juist het civiele onderhoud wordt belicht.

Tenslotte durven we hier op te merken dat veel onderhoudsoptimalisatietheorie is ontwikkeld door wiskundigen met weinig kennis van de praktijk. De meer pragmatische praktijkmethoden zijn echter door onderhoudsconsultants ontwikkeld met weinig kennis van wiskunde. In de wiskunde is elegantie van methode vaak belangrijker dan praktische relevantie en veel academische wiskundigen zijn afkerig van de praktijk. Het is dan ook te betreuren dat er zo weinig wiskundig goed onderlegde bedrijfskundigen / onderhoudsconsultants zijn die aan de ene kant een goed gevoel hebben wat nu echt nodig is in de praktijk en aan de andere kant makkelijk het wiskundige instrumentarium kunnen inzetten. Er is dan ook nog steeds een grote behoefte aan eenvoudige, praktisch snel bruikbare, maar wetenschappelijk gefundeerde methoden om onderhoud te optimaliseren. Ook geldt dat er nog steeds geen goede overkoepelende bedrijfskundige onderhoudstheorie is, omdat in de meeste praktijkgevallen de auteurs tegen onbekende aspecten zijn gestuit die een uitbreiding van de theorie vereisten. Wil een onderhoudsmodel met succes kunnen worden toegepast, dan vereist dit in wezen dat het op maat (van het onderhavige onderhoudsprobleem) wordt gemaakt.

6. Conclusies

In dit artikel hebben we de rol van onderhoudsoptimalisaties in onderhoudsmanagementtheorie beschreven. Via een viertal cases hebben we de mogelijkheden van deze aanpak in de civiele sector geschetst. In deze situaties wisten we door modelvorming, datavergaring en analyses een onderbouwd advies te geven voor actuele problemen en onderhoudsoptimalisatie bracht daarbij zeker zijn geld op. We stuiten daarbij steeds op de grens van wat er theoretisch bekend is en wisten die grens zelfs wat te verleggen. Vervolgens hebben we de voors en tegens van deze aanpak op een rij gezet. We komen daarbij tot de conclusie dat onderhoudsoptimalisatie erg nuttig kan zijn, maar dat toch verdere ontwikkelingen in de theorie moeten worden gemaakt (zowel uitbreidingen als versimpelingen). Ook is een verdere standaardisatie van informatiesystemen van belang alsmede een bredere verspreiding van standaard beslissingsondersteunende systemen om de analyse te vergemakkelijken.

7. Literatuur

- Ariëns, E.E., & J.M. van Noortwijk. Nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie Rijkswaterstaat; Multi-functionele benadering als uitgangspunt, *Land + Water*, vol. 38(10), p.26-29, 1998.
- Baker, R.D. & A.H. Christer, Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal Operational Research*, vol. 6(1), p.67-83, 1994.
- Bakker, J.D., H.J. van der Graaf, & J.M. van Noortwijk. Model of Lifetime-Extending Maintenance. In M.C. Forde, editor, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair, London, United Kingdom, 1999*. Edinburgh: Engineering Technics Press, 1999.
- Barlow, R.E., & F. Proschan. *Mathematical Theory of Reliability*, New York: John Wiley, 1965.
- Chopra, S, & P. Meindl, *Supply Chain Management: strategy, planning and operation*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- Dekker, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 51, p. 229-240, 1996.
- Dekker, R., & R. Plasmeijer & J. Swart, On the economic evaluation of the joint-to-joint concept for road maintenance, *IMA Journal on Mathematics in Business and Industry*, vol. 9, p.109-156, 1998a.
- Dekker, R., & J.R. van der Meer, R. Plasmeijer, R.E. Wildeman & J.A. de Bruin, Maintenance of light standards, a case study, *Journal Operational Research Society*, vol. 49, p.132-143, 1998.
- Dekker, R., & P.A. Scarf. On the impact of optimization models in maintenance: a state of the art, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 60(2), p.111-119, 1998.
- Dekker, R., F.A. Van der Duyn Schouten and R.E. Wildeman, A review of multicomponent maintenance models with economic dependence, *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 45, p. 411-435, 1997.
- Jorissen, R.E., & J.M. van Noortwijk. Instrumenten voor optimaal beheer van waterkeringen, *Het Waterschap*, vol. 83(1), p.6-12 & vol. 83(2), p.42-47, 1998.
- Gits, C.W. On the maintenance concept for a technical system: a framework for design. *Maintenance Management International*, vol. 6, p.129-146, 181-196, 223-237, 1986.
- Golabi, K, R.B. Kulkarni & G.B. Way, A statewide pavement management system, *Interfaces*, vol. 12, p. 5-21, 1982.
- Golabi, K & R. Shepard, PONTIS: A system for maintenance optimization and improvement of US bridge networks, *Interfaces*, vol. 27(1), p. 71-88, 1997.
- McCall, J.J. Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey, *Management Science*, 11:493-524, 1965.
- Smith, A.M., *Reliability Centred Maintenance*, McGraw-Hill, inc. New York, 1993.
- Rausand, M. & J. Vatn, Reliability Centred Maintenance, in: C.G. Soares (ed.), *Risk and Reliability in Marine Technology*, Balkema, Holland, 1996.
- Timmer, G.T. et al. Voorstudie naar verbeteringen van het rekenhart van het Meerjaren Planning Systeem. *Rapport W XO-R-93-04*, Ortec Consultants BV, Gouda.

- Van Noortwijk, J.M. Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration. In Andrzej S. Nowak, editor, ***Proceedings of the Eighth IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Kraków, Poland***, p. 273-280. Ann Arbor: University of Michigan, 1998.
- Van Noortwijk, J.M., R. Dekker, R.M. Cooke & T.A. Mazzuchi. Expert judgment in maintenance optimization. ***IEEE Transactions on Reliability***, vol. 41(3), p.427-432, 1992.
- Van Noortwijk, J.M., & H.E. Klatter. Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier, ***Reliability Engineering and System Safety***, vol. 65(3), p.203-211, 1999.
- Van Winden, C. & R. Dekker. Rationalisation of building maintenance by Markov decision models: a pilot case study, ***Journal of the Operational Research Society***, vol. 49, p. 928-935, 1998.
- Wang, K.C.P. & J.P. Zaniewski, 20/30 hindsight: the new pavement optimization in the Arizona state highway network, ***Interfaces***, vol. 26(3), p. 77-89, 1996.
- Worm, J. & A. Van Harten, Model based decision support for planning of road maintenance. ***Reliability Engineering System Safety***, vol. 51, p. 305-316, 1996.