



## Inleiding

Bedrijfszekerheidstechnologie en risicoanalyse hebben zich altijd sterk geconcentreerd op het ontwerp van technische systemen omdat beslissingsondersteuning daar een groot effect kan hebben. Het blijkt echter in toenemende mate dat onderhoud tijdens het functioneren van een systeem veel geld opslokt. Gelukkig houdt daarom een deel van de bedrijfszekerheidstechnologen zich ook bezig met het optimaliseren van onderhoud. Zij doen dat met een kwantitatieve aanpak. Eerst worden mogelijke slijtagevormen en faalwijzen geïnventariseerd met hun effect op het functioneren van het systeem, daarna vindt er een modellering van deze processen plaats en wordt een model opgesteld dat de kosten van mogelijke onderhoudsacties koppelt aan het effect op het functioneren van een systeem. Via modelberekeningen met een computer kunnen dan verschillende opties met elkaar vergeleken worden en een advies worden opgesteld. In deze bijdrage willen we deze aanpak aan de hand van een viertal praktijkvoorbeelden illustreren.

## Onderhoudsvormen

Het is gebruikelijk om onderhoud te definiëren als het geheel van activiteiten, waarmee de functionele kwaliteit van een onderdeel wordt teruggebracht tot het gewenste kwaliteitsniveau. Hierbij zijn inspecties, reparaties, vervangingen en levensduurverlengende maatregelen mogelijke onderhoudsacties. Door levensduurverlengend onderhoud kan de 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. 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 onderschrijden van een van te voren vastgestelde faal- of veiligheidsnorm. Fysiek falen treedt op bij het bezwijken of daadwerkelijk kapot gaan van een onderdeel. Preventief onderhoud is veelal te prefereren boven correctief onderhoud als de gevolgeffekten van een storing groot zijn (qua kosten of veiligheid).

## Preventief onderhoud

Preventief onderhoud kan worden onderverdeeld in tijds-, gebruiks-, belastings- en toestandsafhankelijk preventief onderhoud. Tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd na een vaste leeftijd, gebruiksduur of belasting, zoals bij het ververset 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. Toestandsafhankelijk preventief onderhoud wordt daarentegen uitgevoerd op basis van het inspecteren van de toestand of conditie van een onderdeel, zoals bij het inspecteren van de blokkenmatten van de Oosterscheldekering. 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 onderschreden, of er moet preventief onderhoud worden

uitgevoerd omdat de conditie wel het preventieve interventieniveau, maar nog niet het faalniveau, heeft onderschreden, 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 risico-afweging op basis van kosten. 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. 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 gedisconteerd naar het huidige jaar. Het disconteren 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).

## 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.

## Literatuuroverzicht onderhoudsoptimalisatiemodellen

De eerste welbekende onderhoudsoptimalisatiemodellen werden gepubliceerd in de zestiger jaren door Barlow & Proschan [1] en McCall [2]. Daarna zijn er veel publicaties verschenen, maar helaas niet alle even bruikbaar. Nog niet zo lang geleden zijn door één van de auteurs overzichten gemaakt van de stand van zaken met betrekking tot de toepassing van dit soort modellen [3,4]. In het algemeen kan men stellen dat tekortschietende computerhardware en -software in het verleden een belangrijke bottleneck was voor het toepassen van de modellen. Ook was de theorie vaak als doel op zich ontwikkeld in plaats van in samenhang met toepassingen. De laatste tijd zijn er echter steeds meer succesvolle toepassingen te vinden, waarvan er in dit stukje een aantal beschreven worden.

## Voorbeeld 1: beheer en onderhoud natte infrastructuur

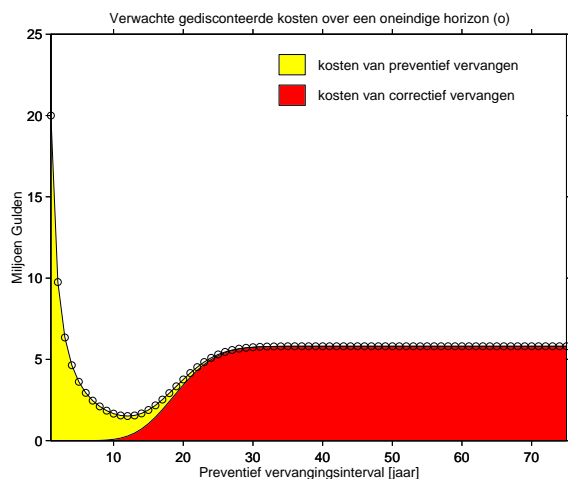
Vanwege de toenemende omvang van de Nederlandse infrastructuur wordt de aandacht voor het beheer en onderhoud hiervan steeds belangrijker. Rijkswaterstaat is zodoende sinds enkele jaren bezig met het invoeren van een nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie met als uitgangspunt het centraal stellen van 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), watersysteemdelen (Lobith - Nijmegen) en objecten (een sluis of een oevervak). Per functie wordt het streefbeeld aangegeven, het na te streven kwaliteitsniveau. Streefbeeld zijn een toegekende vaarwegklasse, een af te voeren hoeveelheid water, een gewenste flora en fauna. Deze streefbeeld 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

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 civiel-technische kunstwerken zoals sluizen worden de instandhoudingsmaatregelen en de bijbehorende inspecties per onderdeel uiteindelijk

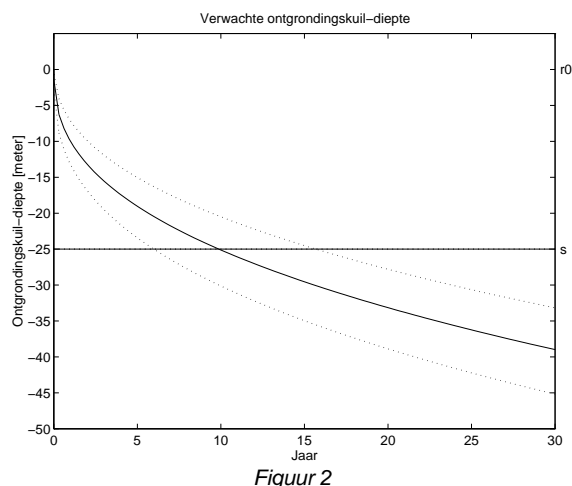
gebundeld tot een onderhouds- en inspectieplan voor het betreffende kunstwerk.

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 leeftijdvervangingsmodel [1,7]. Op basis van het criterium van de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon 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 vervangingsprobleem is weergegeven in figuur 1. Indien de kosten van correctief vervangen tien keer zo groot zijn als de kosten van preventief vervangen en indien het verwachte faaltijdstip ongeveer gelijk is aan 20 jaar, dan is het preventieve vervangingsinterval waarvoor de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon minimaal zijn gelijk aan 12 jaar. Op basis van de verwachte veroudering, kan dit optimale preventieve interventie-interval bij benadering vervolgens worden getransformeerd naar een optimaal preventief interventie-niveau. Meer informatie over het beheer en onderhoud van de natte infrastructuur is te vinden in [5,6,7].

## 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 [8].



Figuur 2

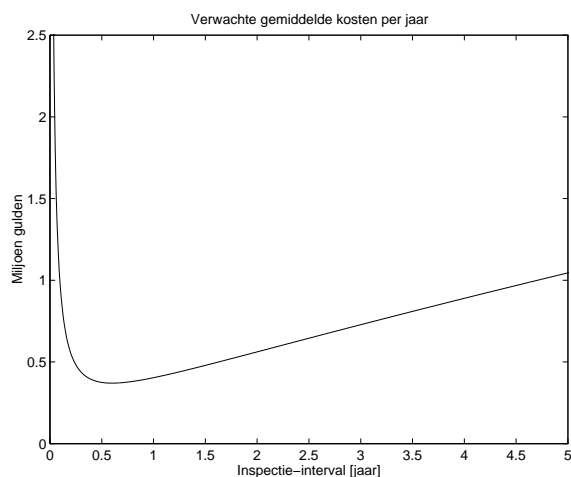
De blokkenmatten bevinden zich aan weerszijde van de kering en hebben als doel de geotechnische stabiliteit van de kering te waarborgen door ontgroning te voorkomen. De blokkenmatten kunnen echter zodanig worden beschadigd, dat er toch zand wegspoelt en er



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 HKV Lijn in Water 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

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 Oosterscheldkering 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. Het 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 in één keer opgelapt worden en het verkeer via permanente wegbarriers over de andere rijstrook geleid wordt. Hierdoor zou een weg minder vaak onderhouden 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 - in het algemeen minder goed is dan individueel toestandsafhankelijk onderhoud. Door de Erasmus Universiteit is een vergelijking tussen beide typen onderhoud middels een kwantitatief model uitgevoerd. Uit dit onderzoek bleek dat ook bij het tweede type onderhoud zo nu en dan klein onderhoud nodig is, omdat de veroudering sterk per wegsegment kan variëren. 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. Overigens zou men in ploegendienst moeten werken om de duur van de wegafzetting beperkt te houden. Een uitgebreid verslag is te lezen in [9].

### Voorbeeld 4: optimalisatie van lampenvervanging

Een groot havenbedrijf had tientallen lichtmasten op haar terrein staan ter verlichting van haar dag- en nachtdoorgaande activiteiten. In elke lichtmast waren 15 lampen in een krans opgesteld. Bij het ontwerp van de masten was al enige redundantie ingebouwd. Pas als er 4 lampen stuk waren, was het nodig om de krans omlaag te halen om de lampen te vervangen. Een activiteit die men overigens niet graag deed omdat het havenoperaties hinderde. De vraag was nu of bij het vervangen van de kapotte lampen ook de nog werkende lampen vervangen moesten worden en zo ja, wat het criterium daarvoor moest zijn. Dit probleem is door een afstudeerder van de Erasmus Universiteit aangepakt. Vier strategieën zijn onderzocht: (i) de strategie die alleen de kapotte lampen vervangt, (ii) de strategie die ook de andere lampen preventief vervangt, (iii) de strategie die alle werkende lampen vervangt als er een bepaalde kritieke tijd is verstreken en (iv) de strategie die werkende lampen ouder dan een drempelleeftijd vervangt. Deze strategieën werden op basis van literatuurkennis geformuleerd, hoewel het specifieke probleem als zodanig nergens goed beschreven was. De berekening van de kosten behorend bij twee van de strategieën kon alleen met simulatie plaats vinden, hetgeen overigens niet moeilijk is. Een levensduurverdeling werd (in beperkte vorm) door de fabrikant van de lampen aangeleverd. Simpele optimalisatiemethoden leverden de optimale drempelleeftijden. De laatste strategie bleek de beste te zijn, met zo'n 10% lagere kosten, hetgeen niet onaantrekkelijk is. Het ontwerp van de lamp bleek overigens goed te zijn: meer of mindere redundantie was niet zinvol. Wel bleek een cold-standby-redundantie (een reservelamp wordt alleen ingeschakeld als hij nodig is) een nog grotere besparing op te leveren, maar de verwezenlijking van dat soort redundantie laat nog even op zich wachten. Een uitgebreid verslag van dit onderzoek is te vinden in [10].



## Toekomst

Zoals op meerdere plaatsen in de samenleving te zien is, neemt de behoefte aan kwantitatieve onderbouwing van besluitvorming toe. Dat wil niet zeggen dat het overal toegepast zou moeten worden, maar het is economisch aantrekkelijk te weten waar en hoe. De wetenschap zou die kennis kunnen leveren. Een verdere ontwikkeling van de theorie in samenhang met de praktijk is nodig, omdat aan de ene kant de praktische problemen lastiger zijn dan wat in de theorieboeken staat en aan de andere kant de praktijkvrouw/man niet weet hoeveel zij/hij kan besparen door wat beter onderbouwde beslissingen te nemen. Deze ontwikkeling is ook onderwerp van studie in de Werkgroep Onderhoudsoptimalisatie van de NVRB. In deze werkgroep komen onder meer aan de orde: onzekerheid in de modelparameters, combinatie van gebruiksfuncties en onderhoudsacties en eventuele organisatorische belemmeringen.

## Conclusie

Een viertal cases zijn in dit artikel kort beschreven. In deze situaties wisten de auteurs door modelvorming, datavergaring en analyses een onderbouwd advies te geven voor een actueel probleem. Een bedrijfszekerheidsmethode die zijn geld dus zeker opricht. Zij stuiten op de grens van wat er theoretisch bekend is en wisten die grens zelfs wat te verleggen.

## Literatuur

- [1] Barlow, R.E., & F. Proschan. *Mathematical Theory of Reliability*, New York: John Wiley, 1965.
- [2] McCall, J.J. Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey, *Management Science*, 11:493-524, 1965.
- [3] Dekker, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 51: 229-240, 1996.
- [4] Dekker, R., & P.A. Scarf. On the impact of optimization models in maintenance: a state of the art, *Reliability Engineering and System Safety*, 60(2):111-119, 1998.
- [5] Ariëns, E.E., & J.M. van Noortwijk. Nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie Rijkswaterstaat; Multi-funcionele benadering als uitgangspunt, *Land + Water*, 38(10):26-29, 1998.
- [6] Jorissen, R.E., & J.M. van Noortwijk. Instrumenten voor optimaal beheer van waterkeringen, *Het Waterschap*, 83(1):6-12 & 83(2):42-47, 1998.
- [7] 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.
- [8] van Noortwijk, J.M., & H.E. Klatter. Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier, *Reliability Engineering and System Safety*, 65(3):203-211, 1999.
- [9] Dekker, R., R. Plasmeijer & J. Swart, On the economic evaluation of the joint-to-joint concept for road maintenance, *RIMA Journal on Math. in Bus. and Ind.*, 9:109-156, 1998.
- [10] 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*, 49:132-143, 1998.



### Rommert Dekker

Prof.dr.ir. R. Dekker is sinds 1992 hoogleraar wiskundige besliskunde aan de Erasmus Universiteit Rotterdam. Daarvoor was hij zeven jaar werkzaam op het gebied van de bedrijfszekerheid bij Shell, eerstens bij het laboratorium in Amsterdam, daarna bij het centraal kantoor in Den Haag. Hij is daarmee al meer dan 10 jaar betrokken bij de NVRB, in eerste instantie als bedrijfslid, later als persoonlijk lid. Momenteel houdt hij zich bezig met onderzoek en consultancy op het gebied van onderhoudsoptimalisatie en logistiek (reservedelen, retourlogistiek, distributie- en havenlogistiek en voorraadbeheersing). Zijn toepassingen zijn te vinden van gezondheidszorg, wegen, havens, procesindustrie, telecommunicatie tot logistieke dienstverleners.



### Jan M. van Noortwijk

Dr.ir. J.M. van Noortwijk is adviseur risico-analyse en veiligheid bij HKV Lijn in Water te Lelystad. Hij heeft ervaring met advieswerk in de waterbouwkunde en de telecommunicatie op het gebied van onderhoudsoptimalisatie, risico-analyse, expertmeningen, procesplanning en onzekerheidsanalyses. In zijn promotieonderzoek aan de Technische Universiteit Delft heeft hij wiskundige modellen ontwikkeld, waarmee het onderhoud van waterbouwkundige constructies kan worden geoptimaliseerd. Daarnaast heeft Van Noortwijk verschillende onzekerheidsanalyses uitgevoerd o.a. in het kader van het Onderzoek Watersnood Maas, Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR) en Ruimte voor Rijntakken (RvR). Recent heeft hij veel ervaring opgedaan in de bedrijfszekerheidstheorie en wel met name in het berekenen van faalkansen van dijken en inundatiekansen. Zowel de heer van Noortwijk als HKV Lijn in Water zijn lid sinds 1996.