

Onderhoudsoptimalisatie¹

Het modelleren en optimaliseren van onderhoud aan civieltechnische kunstwerken ten behoeve van het opstellen van een instandhoudingsplan.

Prof. Dr. Ir. J.M. van Noortwijk
HKV Lijn in Water, Lelystad en Technische Universiteit Delft

Samenvatting

In deze casestudie wordt een probabilistisch onderhoudsmodel gepresenteerd waarmee een optimale kostenafweging kan worden gemaakt tussen preventief en correctief onderhoud met de toepassingen civieltechnische kunstwerken, rivierbodems en oevers. Er wordt rekening gehouden met de onzekerheid in de veroudering en het faaltijdstip, alsmede met rente en inflatie. Reeds in de ontwerpfase kan een optimale balans bepaald worden tussen initiële investeringskosten enerzijds en toekomstige onderhoudskosten anderzijds.

1. Inleiding

Vanwege de toenemende omvang van de Nederlandse natte infrastructuur wordt de aandacht voor het beheer en onderhoud hiervan steeds belangrijker. Zo zullen onder andere de versterkte zeedijken en grote civieltechnische kunstwerken als sluizencomplexen en stormvloedkeringen in de toekomst optimaal moeten worden beheerd en onderhouden. Verder zijn de meeste Nederlandse waterbouwkundige kunstwerken aangelegd dan wel verbeterd vlak voor of vlak na de Tweede Wereldoorlog.

Rijkswaterstaat is sinds enkele jaren bezig met het invoeren van een nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie. Het uitgangspunt bij deze filosofie is het centraal stellen van de gebruiksfuncties van de infrastructuur. Vanuit deze gebruiksfuncties, en de landelijke afstemming daartussen, worden eisen opgesteld waaraan de infrastructuur moet voldoen. De benodigde beheer- en onderhoudsmaatregelen zijn een afgeleide hiervan. Bovengenoemde ontwikkeling vindt plaats zowel binnen de natte infrastructuur (Beheer Op Peil) als binnen de droge infrastructuur (Wegbeheer 2000). De ontwikkeling krijgt al enkele jaren vorm door het opstellen van regionale en landelijke beheerplannen. In deze plannen wordt veel aandacht besteed aan de onderbouwing van het uit te voeren beheer en onderhoud. In dit hoofdstuk zal nader worden ingegaan op het modelleren en optimaliseren van onderhoud aan civieltechnische kunstwerken, rivierbodems en oevers ten behoeve van het opstellen van een instandhoudingsplan of een BeheerPlan Nat (BPN).

De indeling van dit hoofdstuk is als volgt. De meest gangbare vormen van preventief en correctief onderhoud worden behandeld in §2. Hoe onderhoud vervolgens wiskundig kan worden geformuleerd komt aan de orde in §3. Tevens worden er in deze paragraaf drie kostencriteria geïntroduceerd waarmee onderhoudsbeslissingen met elkaar kunnen

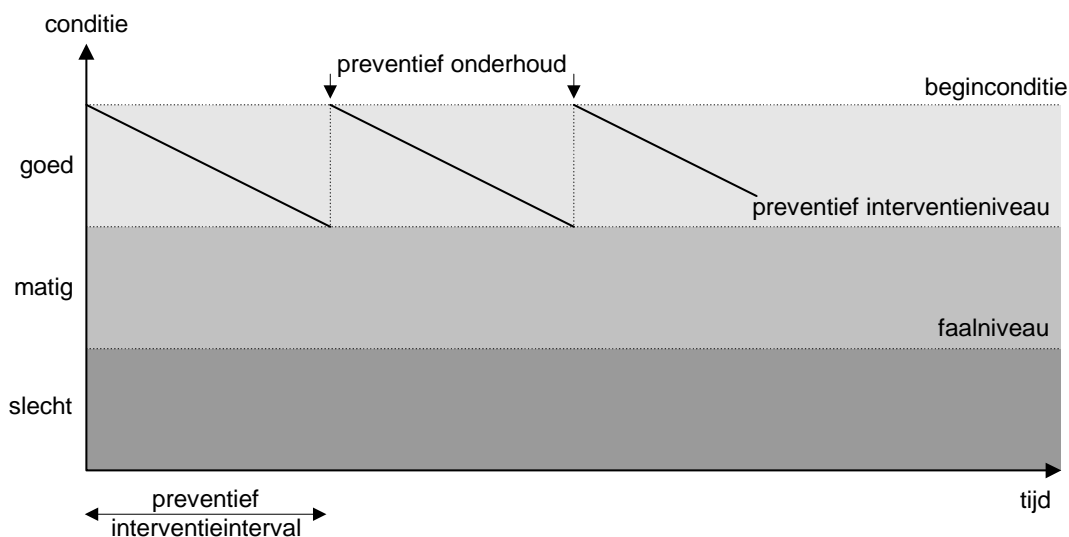
¹ Dit artikel is verschenen in *Kansen in de civiele techniek; Deel 2: Voorbeelden uit de praktijk*, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR) & Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde en Bouwdienst, CUR-publicatie 209, blz. 179-195. Gouda: CUR, 2002.

worden vergeleken: (i) de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid, (ii) de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon en (iii) de verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid. Op basis van de onzekerheden in de veroudering en het faaltijdstip, die worden behandeld in §4, kunnen uiteindelijk optimale preventieve interventie-intervallen en -niveaus worden verkregen waarvoor de verwachte kosten minimaal zijn (zie §5). De onderhoudsmethodiek is toegepast bij het optimaliseren van het onderhoud van opzetcilinders in §6. Conclusies zijn ten slotte te vinden in §7.

2. Onderhoud van constructies

Objecten als civieltechnische kunstwerken, rivierbodems en oevers dienen over het algemeen meer dan één gebruiksfunctie te vervullen. Te denken valt hierbij aan de functies veiligheid, natuur, landschap, recreatie, scheepvaart, verkeer, landbouw en visserij. Het doel van onderhoud is nu om ervoor te zorgen dat een object zodanig aan zijn functies voldoet dat de functionele kwaliteit ervan goed is.

Als een object niet meer of onvoldoende voldoet aan zijn belangrijkste functies, dan is er sprake van falen. Meestal zal falen moeten worden voorkomen door middel van preventief onderhoud. Hierbij zijn twee manieren van falen te onderscheiden: normfalen en fysiek falen. Normfalen treedt op bij het overschrijden van een van te voren vastgestelde faal- of veiligheidsnorm (bijvoorbeeld wanneer de kruinhoogte van een dijk kleiner is dan de maatgevende ontwerpwaterstand). Fysiek falen treedt op bij het bezwijken of daadwerkelijk kapot gaan van een objectonderdeel (bijvoorbeeld wanneer de kruinhoogte van een dijk kleiner is dan de actuele waterstand).



Figuur 1: Verwachte conditie (sterkte) met interventieniveau en faalniveau.

Het is gebruikelijk om onderhoud te definiëren als het geheel van activiteiten, waarmee de functionele kwaliteit van een object (of een onderdeel ervan) wordt teruggebracht tot, of wordt gehouden op, het gewenste kwaliteitsniveau (CUR, 1997, Paragraaf 7.3). Hierbij zijn inspecties, reparaties, vervangingen en levensduurverlengende maatregelen mogelijke onderhoudsacties. Door levensduurverlengende maatregelen kan de veroudering worden

vertraagd, waardoor het moment van falen wordt uitgesteld en waarmee dus de levensduur van een objectonderdeel wordt verlengd. Het bijwerken van roestplekjes bij geconserveerde sluisdeuren valt in deze categorie. Globaal zijn er twee typen onderhoud te onderscheiden, namelijk *correctief of curatief onderhoud* (ná falen) en *preventief onderhoud* (vóór falen). Preventief onderhoud is te prefereren boven correctief onderhoud indien de kosten van correctief onderhoud wegens de gevolggkosten veel hoger zijn dan de kosten van preventief onderhoud (zie ook CUR, 1997, figuur 7.11).

Preventief onderhoud kan verder worden onderverdeeld in tijds-, gebruiks-, belastings- en toestandsafhankelijk preventief onderhoud (CUR, 1997, Paragraaf 7.3). Tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd na een vaste leeftijd, gebruiksduur of belasting. Toestandsafhankelijk preventief onderhoud wordt uitgevoerd op basis van het inspecteren van de toestand of conditie van een objectonderdeel. In het geval van toestandsafhankelijk preventief onderhoud kunnen zich drie mogelijkheden voordoen (zie figuur 1): of (i) er hoeft niets te worden gedaan omdat de conditie het preventieve interventieniveau nog niet heeft overschreden, of (ii) er moet preventief onderhoud worden uitgevoerd omdat de conditie wel het preventieve interventieniveau, maar nog niet het faalniveau, heeft overschreden, of (iii) er moet correctief onderhoud worden uitgevoerd als gevolg van falen omdat de conditie het fysiek- of normfaalniveau heeft bereikt.

Het preventieve interventie-interval en -niveau 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 de beheerder hierbij van dienst zijn. De kosten van onderhoud kunnen veelal worden onderverdeeld in de directe vervangingskosten van een objectonderdeel en de indirecte maatschappelijke gevolggkosten ten gevolge van functieverlies, zoals een scheepvaartstremming door onderhoud aan of falen van een sluis.

3. Wiskundige formulering van onderhoud

3.1 Kostencriteria

Het onderhoud van een constructie kan wiskundig meestal worden gemodelleerd als een vernieuwingsproces, waarbij de vernieuwingen kunnen worden gezien als de onderhoudsactiviteiten die de conditie terugbrengen tot het gewenste beginconditieniveau. Statistisch gezien wordt er na elke vernieuwing dan weer opnieuw begonnen. Aangezien de geplande levensduur van de meeste waterbouwkundige constructies meestal zeer groot is, kunnen onderhoudsbeslissingen bij benadering veelal worden vergeleken over een oneindige tijdshorizon.

Volgens Wagner (1975, Hoofdstuk 11) zijn er ruwweg drie typen kostencriteria die kunnen worden gebruikt voor het vergelijken van beslissingen over een oneindige tijdshorizon:

1. de *verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid*, die worden verkregen door de verwachte kosten te middelen over een oneindige tijdshorizon;

2. de *verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon*, die worden verkregen door de verwachte gediscoteerde kosten (de contante waarden van de kosten) te sommeren over een oneindige tijdshorizon;
3. de *verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid*, die worden verkregen door de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon om te rekenen naar de gediscoteerde kosten per tijdseenheid.

Door het begrip ‘equivalente gemiddelde kosten’ relateren de begrippen ‘gemiddelde kosten’ en ‘gediscoteerde kosten’ aan elkaar, in die zin dat de equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid naderen tot de gemiddelde kosten per tijdseenheid bij een discontovoet die van de bovenkant tot 0% nadert (zie §3.4). De criteria van gediscoteerde kosten en equivalente gemiddelde kosten zijn het meest geschikt om een optimale balans te vinden tussen initiële investeringskosten en toekomstige onderhoudskosten (in de ontwerpfase). Het criterium van de gemiddelde kosten kan alleen worden toegepast als er geen grote investeringen worden gemaakt, zoals bij het plannen van inspecties (in de gebruiksfase).

Voorbeelden van onderhoudsoptimalisatie in de ontwerpfase zijn het bepalen van optimale dijkophogingen [zie Speijker et al. (2000) en Jorissen & van Noortwijk (1998)] en optimale zandsuppleties [van Noortwijk & Peerbolte (2000)] waarvoor de verwachte gediscoteerde kosten minimaal zijn. Voorbeelden van onderhoudsoptimalisatie in de gebruiksfase zijn het bepalen van optimale inspectiefrequenties voor dijken, dynamisch-stabiele golfbrekers, en de overgangsconstructie en de blokkenmatten van de Oosterscheldekering [zie respectievelijk Kuijper (1992), van Noortwijk & van Gelder (1996), van Noortwijk, Kok & Cooke (1997) en van Noortwijk & Klatter (1999)], alsmede het bepalen van optimale preventieve interventie-intervallen en -niveaus voor civiel-technische kunstwerken, rivierbodems en oevers [zie Ariëns & van Noortwijk (1998) en van Noortwijk (1998)].

De verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid, de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon en de verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid kunnen eenvoudig worden berekend indien het onderhoudsproces wordt geformuleerd als een discreet vernieuwingsproces. Een discreet vernieuwingsproces $\{N(n): n=1,2,3, \dots\}$ is een niet-negatief stochastisch proces, gedefinieerd met betrekking tot discrete tijdseenheden, dat de opeenvolgende vernieuwingen registreert in tijdsinterval $(0,n]$. In ons geval worden de vernieuwingen gerepresenteerd door onderhoudsactiviteiten die het objectonderdeel terugbrengen in zijn “zo-goed-als-nieuw-toestand”. Zij de vernieuwingstijdstippen T_1, T_2, \dots , niet-negatieve, onafhankelijke, identiek-verdeelde, stochastische grootheden met een discrete kansfunctie $\Pr\{T_k=i\} = p_i, i=1,2,3,\dots$, waarbij p_i de kans op een vernieuwing in tijdseenheid i representeert wanneer de beslisser een bepaalde onderhoudsbeslissing neemt. Verder worden de kosten van een vernieuwing in tijdseenheid i aangeduid met $c_i, i=1,2,3,\dots$. Bovenstaande drie kostencriteria zullen in de navolgende paragrafen nader worden toegelicht.

3.2 Gemiddelde kosten per tijdseenheid

De verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid kunnen worden bepaald door de kosten te middelen over een oneindige tijdshorizon. Zij kunnen worden afgeleid van de verwachte

kosten over de eindige tijdshorizon $(0, n]$, aangeduid met $E(K(n))$, welke functie de oplossing is van de recursieve vergelijking

$$E(K(n)) = \sum_{i=1}^n p_i [c_i + E(K(n-i))], \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad K(0) \equiv 0. \quad (1)$$

Deze vergelijking wordt verkregen door te conditionaliseren op de mogelijke waarden van het eerste vernieuwingstijdstip T_1 en de 'regel van de totale waarschijnlijkheid' (CUR, 1997, Bijlage A) toe te passen. Gegeven dat de eerste vernieuwing plaatsvindt op tijdstip i , met andere woorden gegeven dat $T_1=i$, zijn de bijbehorende kosten gelijk aan c_i plus de verwachte additionele kosten in het tijdsinterval $(i, n]$, $i=1, \dots, n$.

Met behulp van de discrete vernieuwingsstelling [zie Feller (1950, Hoofdstuk 12 & 13) en Karlin & Taylor (1975, Hoofdstuk 3)] kunnen de verwachte *gemiddelde kosten per tijdseenheid* worden geschreven als

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(K(n))}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} c_i p_i}{\sum_{i=1}^{\infty} i p_i}. \quad (2)$$

Indien een vernieuwingscyclus is gedefinieerd als de tijdsperiode tussen twee vernieuwingen, dan kan de teller worden herkend als de verwachte cycluskosten en de noemer als de verwachte cycluslengte. Vergelijking (2) is een bekend resultaat uit de 'renewal reward theory' (Ross, 1970, Hoofdstuk 3). Indien in vergelijking (2) geldt dat $c_i=1$ voor alle $i=1, 2, 3, \dots$, dan is het verwachte aantal vernieuwingen per tijdseenheid gelijk aan:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(N(n))}{n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\infty} i p_i}, \quad (3)$$

ofwel de reciproque van de verwachte levensduur.

3.3 *Gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon*

Bij de vergelijking van onderhoudsstrategieën hebben we vaak te maken met kosten die op verschillende tijdstippen worden gemaakt. Er zal dan ook meestal rekening moeten worden gehouden met het feit dat de waarde van één gulden over tien jaar kleiner is dan de waarde van één gulden vandaag. In dit verband is het gangbaar om de toekomstige kosten om te rekenen naar de zogenaamde contante waarde van deze kosten in het huidige jaar of, met andere woorden, om de toekomstige kosten met behulp van een discontovoet te disconteren of te kapitaliseren naar het huidige jaar. Als discontovoet wordt over het algemeen de reële rentevoet genomen, dat wil zeggen de rentevoet minus de inflatie. Voor de inflatievrije discontovoet wordt momenteel doorgaans een percentage van 5% gehanteerd. Hoe verder weg in de toekomst bepaalde kosten worden gemaakt, des te kleiner de bijdrage aan de contante waarde en des te minder tellen ze dus mee in een kostenvergelijking. Zo is de contante waarde van kosten ter grootte van 1 miljoen gulden die over 14 jaar worden gemaakt bij een discontovoet van 5% gelijk aan ½ miljoen gulden in het huidige jaar.

De contante waarde van de verwachte onderhouds- en faalkosten is van nut bij het reserveren en budgetteren van het toekomstig beheer en onderhoud. In wezen representeert de contante waarde het geldbedrag dat nu op de bank zou moeten worden gezet, of zou moeten worden geïnvesteerd, opdat de instandhouding in de toekomst naar verwachting kan worden betaald. Stel bijvoorbeeld dat 100 gulden wordt geïnvesteerd op basis van een discontovoet van 5% per jaar, dan hebben we na één jaar $(1,05) \times 100 = 105$ gulden, na twee jaar $(1,05)^2 \times 100 = 110$ gulden, na drie jaar $(1,05)^3 \times 100 = 116$ gulden, enzovoort. Omgekeerd is de contante waarde van een kostenpost ter grootte van 100 gulden, die over één jaar gemaakt wordt gelijk aan $100/[1,05] = 95$ gulden, die over twee jaar gemaakt wordt gelijk aan $100/[(1,05)^2] = 91$ gulden, die over drie jaar gemaakt wordt gelijk aan $100/[(1,05)^3] = 86$ gulden, enzovoort. In wiskundige termen is de contante waarde van de kosten c_n , die in jaar n worden gemaakt, gedefinieerd als $\alpha^n c_n$ met discontofactor $\alpha = [1+(r/100)]^{-1}$ en discontovoet $r\%$, $r > 0$.

De verwachte gedisconteerde kosten over een eindige tijdshorizon kunnen met een recursieve formule worden verkregen, die vergelijkbaar is met de formule voor de verwachte niet-gedisconteerde kosten in vergelijking (1). In dit geval gaan we uit van de contante waarde van de vernieuwingskosten c_i plus de additionele verwachte gedisconteerde kosten in tijdsinterval $(i, n]$, $i=1, \dots, n$. De verwachte gedisconteerde kosten over de eindige tijdshorizon $(0, n]$, aangeduid met $E(K_\alpha(n))$, kunnen zodoende worden geschreven als

$$E(K_\alpha(n)) = \sum_{i=1}^n \alpha^i p_i [c_i + E(K_\alpha(n-i))], \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad K_\alpha(0) \equiv 0. \quad (4)$$

Met behulp van Feller (1950, Hoofdstuk 13), kunnen de verwachte *gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon* worden geschreven als

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(K_\alpha(n)) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i c_i p_i}{1 - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i p_i} = k(\alpha). \quad (5)$$

Het is belangrijk om op te merken dat bij een gangbare discontovoet van 5% per jaar, de verwachte kosten over een eindige tijdshorizon langer dan vijftig jaar uitstekend kunnen worden benaderd door de verwachte kosten over een oneindige tijdshorizon.

3.4 *Equivalenten gemiddelde kosten per tijdseenheid*

Door het begrip 'equivalente gemiddelde kosten' relateren de begrippen 'gemiddelde kosten' en 'gedisconteerde kosten' aan elkaar. Deze relatie kan worden verkregen door een oneindige reeks van identieke kosten per tijdseenheid te construeren met dezelfde contante waarde als de verwachte gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon $k(\alpha)$. Dit kan gemakkelijk worden bewerkstelligd door het definiëren van een oneindige reeks van kosten op de tijdstippen $i=0, 1, 2, \dots$ die alle gelijk zijn aan $(1-\alpha)k(\alpha)$. Na toepassing van de geometrische reeks geldt dan dat

$$[1 + \alpha^1 + \alpha^2 + \dots](1 - \alpha)k(\alpha) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i (1 - \alpha)k(\alpha) = k(\alpha)$$

voor $0 < \alpha < 1$. We duiden $(1 - \alpha)k(\alpha)$ aan met de verwachte *equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid*. Met behulp van de regel van L'Hôpital kan worden bewezen dat, als α van de onderkant tot 1 nadert, de verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid naderen tot de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid:

$$\lim_{\alpha \uparrow 1} (1 - \alpha) \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i c_i p_i}{1 - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i p_i} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} c_i p_i}{\sum_{i=1}^{\infty} i p_i}.$$

3.5 Initiële investeringskosten

Bij het bepalen van kostenoptimale investeringsbeslissingen zijn we geïnteresseerd in het vinden van een optimale balans tussen de initiële investeringskosten en de toekomstige onderhoudskosten. Voor dit doel moeten de initiële kosten worden opgeteld bij de verwachte toekomstige kosten. Stel dat de investeringskosten in totaal c_0 gulden bedragen. Het financiële verlies berekend over een oneindige tijdshorizon is dan de som van de initiële kosten en de verwachte gedisconteerde toekomstige kosten

$$L_{\alpha} = c_0 + \lim_{n \rightarrow \infty} E(K_{\alpha}(n)).$$

De bijbehorende verwachte equivalente gemiddelde kosten per tijdseenheid zijn $(1 - \alpha)L_{\alpha}$.

In dit verband zij opgemerkt dat het criterium van de verwachte gemiddelde kosten per tijdseenheid niet geschikt is voor het bepalen van kostenoptimale investeringsbeslissingen. Dit wordt veroorzaakt doordat de bijdrage van de initiële kosten aan de gemiddelde kosten volledig wordt verwaarloosd:

$$L = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_0 + E(K(n))}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(K(n))}{n}.$$

4. Onzekerheid in veroudering en faaltijdstip

Een complicerende factor bij het modelleren van onderhoud is dat conditieverloop en faaltijdstip onzeker zijn. Hoe de conditie van een objectonderdeel in de loop der tijd door veroudering achteruit gaat, is immers op voorhand niet te zeggen. Als voorbeeld kan worden genoemd een verouderende dijk waarvan de kruinhoogte door zakking en relatieve zeespiegelstijging beneden het faalniveau zakt. Door de onzekerheid in de veroudering te modelleren met behulp van een stochastisch proces, kunnen mogelijke variaties in de veroudering expliciet in een onderhoudsmodel worden verwerkt (CUR, 1997, Hoofdstuk 5).

4.1 Stochastisch verouderingsproces

Op het eerste gezicht lijkt het mogelijk om de onzekerheid in de veroudering te representeren met behulp van de normale verdeling. Deze kansverdeling wordt onder meer gebruikt bij het modelleren van de koerswaarde van aandelen en de beweging van kleine deeltjes in vloeistof of lucht. Bij het gebruik van dit model kan de conditie van een constructie echter afwisselend toe- of afnemen, net zoals bij de koerswaarde van een aandeel, waardoor dit model veelal niet geschikt is om het verouderingsgedrag van constructies te beschrijven. Zo is er bij een normaalverdeelde zakking van een dijk een theoretische kans dat een dijk spontaan omhoog komt, hetgeen in de praktijk uiteraard niet gebeurt. Om te bewerkstelligen dat de conditie alleen kan afnemen, kan de onzekerheid in de veroudering het beste worden gemodelleerd met behulp van een zogenoemd 'gammaproces'.

Indien een verouderingsproces wordt gemodelleerd met behulp van een gammaproces, dan zijn de verouderingstoename onafhankelijk verdeeld volgens een gammaverdeling. Een stochastische grootte X heeft een gammaverdeling met vormparameter $v > 0$ en schaalparameter $u > 0$ als zijn kansdichtheidsfunctie kan worden geschreven als:

$$\text{Ga}(x | v, u) = [u^v / \Gamma(v)] x^{v-1} \exp\{-ux\} I_{(0, \infty)}(x)$$

met verwachting v/u en variantie $v/(u^2)$. Hierbij is $I_A(x)$ de indicatorfunctie, met $I_A(x) = 1$ voor $x \in A$ en $I_A(x) = 0$ voor $x \notin A$, en is

$$\Gamma(v) = \int_{t=0}^{\infty} t^{v-1} \exp\{-t\} dt, \quad v > 0,$$

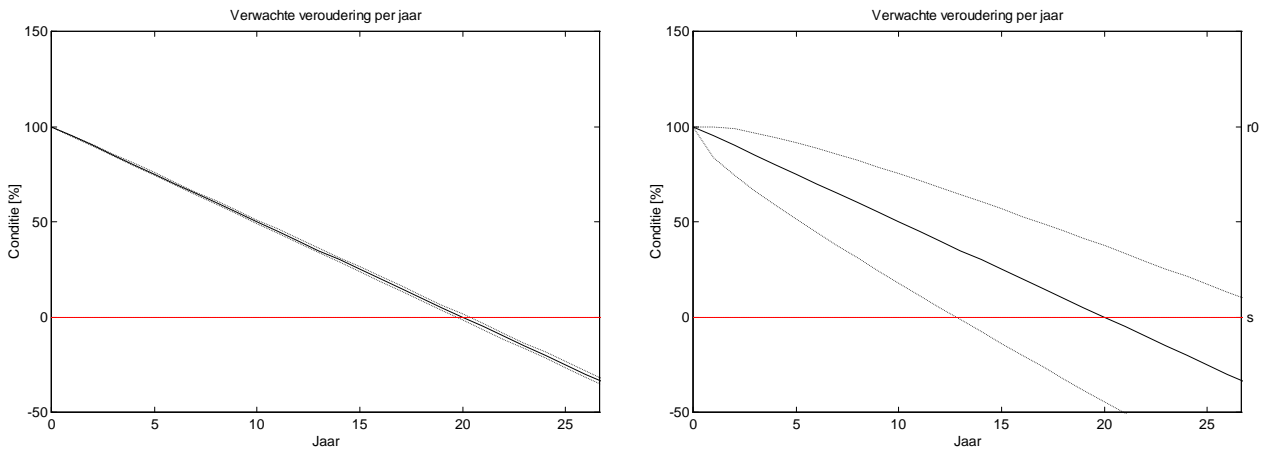
gedefinieerd als de gammafunctie.

De eenvoudigste manier waarop een gammaproces kan worden gedefinieerd is als volgt. Zij $X(t)$ de veroudering op tijdstip t , $t \geq 0$, en laat de kansdichtheidsfunctie van $X(t)$ gegeven zijn door:

$$f_{X(t)}(x) = \text{Ga}(x | [\mu^2 t] / \sigma^2, \mu / \sigma^2)$$

met $\mu, \sigma > 0$, $E(X(t)) = \mu t$ en $\text{Var}(X(t)) = \sigma^2 t$. Zowel de verwachte waarde als de variantie van de veroudering zijn zo een lineaire functie van de tijd. Voor een verwachte veroudering die niet-lineair is in de tijd, zij verwezen naar van Noortwijk & Klatter (1999).

Ter illustratie beschouwen we een objectonderdeel met een beginconditie (de conditie in het jaar 0) van $r_0 = 100\%$, een faalniveau van $s = 0\%$ en een verwachte veroudering van $\mu = 5\%$ per jaar (zie figuur 2). De onzekerheid in deze veroudering is in figuur 2 weergegeven in de vorm van het 5de en het 95ste percentiel. Tezamen kunnen deze onzekerheidsintervallen (de twee stippellijnen) worden geïnterpreteerd als de boven- en ondergrens, waartussen de conditie zich in 90% van de gevallen zal bevinden. Er zijn twee voorbeelden bestudeerd: één met bijna geen onzekerheid in de jaarlijkse veroudering ($\sigma = 0,2\%$) en één met grote onzekerheid ($\sigma = 5,6\%$).



Figuur 2: Verwachte veroudering met bijbehorende onzekerheid in de vorm van 90%-onzekerheidsintervallen, een vaste beginconditie en een vast faalniveau. Van links naar rechts: a) bijna geen onzekerheid in de veroudering en b) grote onzekerheid in de veroudering.

Wat betreft de onzekerheden in de beginconditie en het faalniveau zij het volgende opgemerkt. Aangezien de onzekerheid in de beginconditie meestal veel kleiner is dan de onzekerheid in de veroudering, kan de onzekerheid in de beginconditie worden verwaarloosd. Verder is het faalniveau vaak een afspraak in de vorm van een van te voren bepaalde faal- of veiligheidsnorm, waardoor ook het faalniveau vast mag worden verondersteld.

4.2 Stochastisch faaltijdstip

Een objectonderdeel faalt wanneer zijn conditie (dat wil zeggen de beginconditie minus de veroudering) kleiner is dan een van te voren vastgesteld faalniveau. In termen van veroudering definiëren we het niveau y als de beginconditie r_0 minus de ontwerpbelasting s , ofwel $y = r_0 - s$. Op basis van de stochastische veroudering en het deterministische beginconditieniveau en faalniveau kan de faalkans per jaar worden uitgerekend. Deze faalkans per jaar is gelijk aan de kans dat de conditie in dat jaar voor het eerst kleiner is dan het faalniveau of dat de veroudering in dat jaar voor het eerst groter is dan het beginconditieniveau minus het faalniveau.

De levensduur of het faaltijdstip, dat wil zeggen het tijdstip waarop de conditie voor het eerst het faalniveau onderschrijft, wordt aangeduid met T (in jaren). Vanwege de gammaverdeelde veroudering kan de continue levensduurverdeling dan eenvoudig worden geschreven als

$$F(t) = \Pr\{T \leq t\} = \Pr\{X(t) \geq y\} = \int_{x=y}^{\infty} f_{X(t)}(x) dx = \frac{\Gamma([\mu^2 t]/\sigma^2, [y\mu]/\sigma^2)}{\Gamma([\mu^2 t]/\sigma^2)},$$

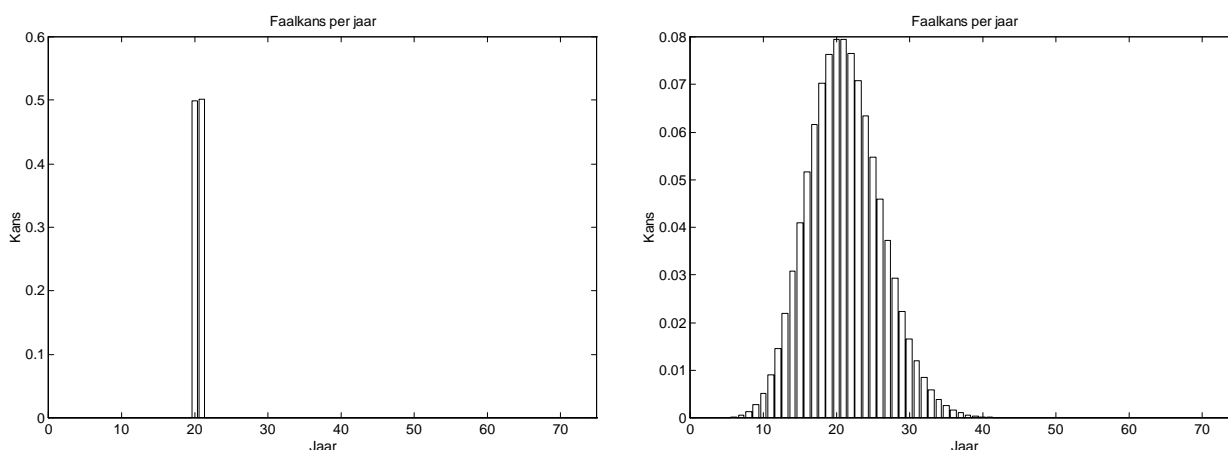
waarbij

$$\Gamma(v, x) = \int_{t=x}^{\infty} t^{v-1} \exp\{-t\} dt, \quad x \geq 0, \quad v > 0,$$

gedefinieerd is als de incomplete gammafunctie. De gediscretiseerde faalkans per jaar, aangeduid met q_i , $i=1,2,3,\dots$, volgt nu onmiddellijk uit de continue levensduurverdeling:

$$q_i = F(i) - F(i-1), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Op basis van de gammaverdeelde veroudering kan nu 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 beneden het faalniveau zakt (zie figuur 3).

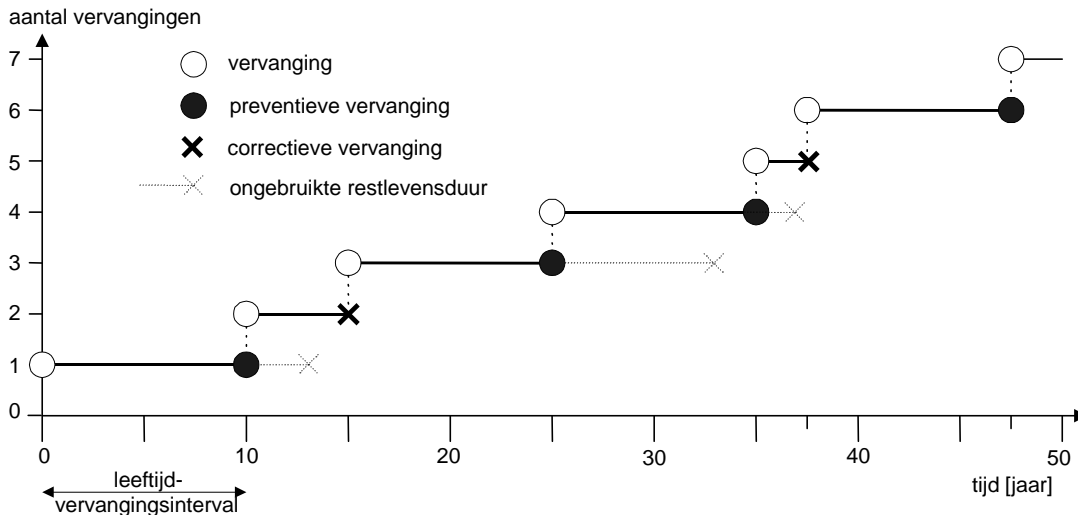


Figuur 3: Faalkans per jaar bij het niet uitvoeren van preventief onderhoud voor een onzekere veroudering. Van links naar rechts: a) bijna geen onzekerheid in de veroudering en b) grote onzekerheid in de veroudering.

5. Optimalisatie van onderhoud

5.1 Leeftijdvervangingsstrategie

Een eenvoudige preventieve onderhoudsstrategie - afkomstig uit de werktuigbouwkunde - is de leeftijdvervangingsstrategie (Barlow & Proschan, 1996). Deze strategie houdt in dat een objectonderdeel wordt vervangen na een vaste leeftijd *of* na falen, afhankelijk van wat het eerst plaatsvindt. Merk op dat een leeftijdvervangingsstrategie pas dan preventief is indien falen onwaarschijnlijk is. Ook bij een preventieve onderhoudsstrategie kan het echter voorkomen, dat zo nu en dan toch een correctieve onderhoudsmaatregel moet worden uitgevoerd. De van te voren vastgestelde vervangingsleeftijd in een leeftijdvervangingsstrategie zullen we in het vervolg het preventieve interventie-interval noemen.



Figuur 4: Leeftijdvervangingsstrategie met preventief interventie-interval van 10 jaar. De faaltijdstippen zijn achtereenvolgens: 13, 5, 18, 12, 2½ en 15 jaar.

Bij een leeftijdvervangingsstrategie met een preventief interventie-interval van, zeg, 10 jaar wordt een objectonderdeel correctief vervangen als gevolg van falen indien het faaltijdstip kleiner is dan 10 jaar en wordt het onderdeel preventief vervangen indien het faaltijdstip groter zou zijn dan 10 jaar. Ter illustratie bekijken we een type onderdeel, dat inmiddels 6 maal is vervangen waarvan 4 maal preventief en 2 maal correctief (zie figuur 4). Aannemende dat de bijbehorende faaltijdstippen achtereenvolgens 13, 5, 18, 12, 2½ en 15 jaar zijn, zijn de vervangingstijdstippen respectievelijk 10, 5, 10, 10, 2½ en 10 jaar.

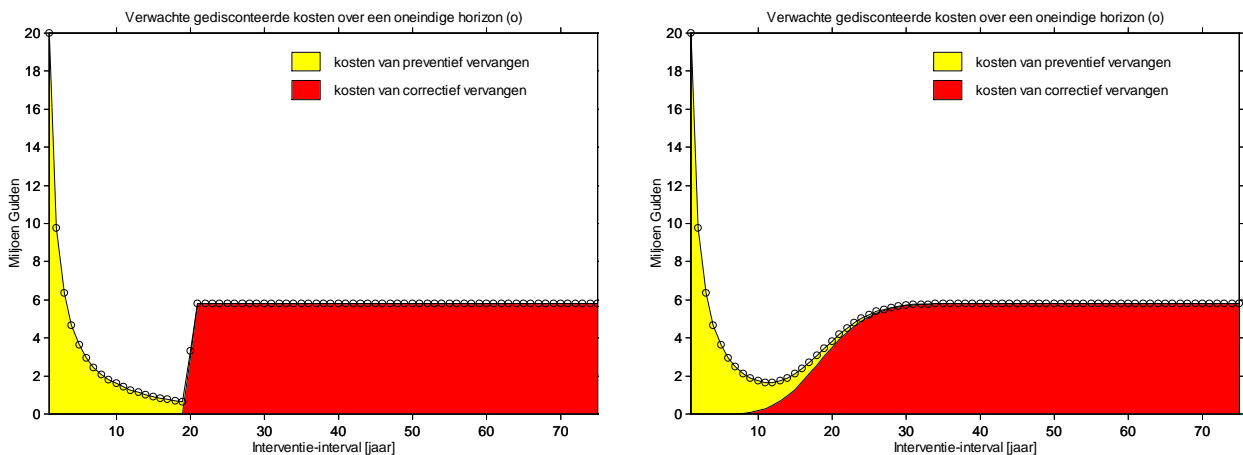
De verwachte gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon kunnen worden berekend door de contante waarden van de toekomstige verwachte kosten over een oneindige tijdshorizon te sommeren. Een leeftijdvervangingsstrategie houdt in dat een objectonderdeel wordt vervangen of op het moment van falen (correctieve vervanging) of op leeftijd k (preventieve vervanging), afhankelijk van wat het eerst plaatsvindt, waarbij $k=1,2,3, \dots$. De kosten van een preventieve en correctieve vervanging zijn respectievelijk gelijk aan c_P en c_F , waarbij $0 < c_P \leq c_F$. Volgens vergelijking (5) kunnen de verwachte gedisconteerde kosten over een oneindige horizon worden geschreven als (zie van Noortwijk, 1996)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(K_\alpha(n)) = \frac{(\sum_{i=1}^k \alpha^i q_i) c_F + \alpha^k (1 - \sum_{i=1}^k q_i) c_P}{1 - [(\sum_{i=1}^k \alpha^i q_i) + \alpha^k (1 - \sum_{i=1}^k q_i)]} \quad (6)$$

Indien tevens de investeringskosten in aanmerking moeten worden genomen dan moet $c_0 = c_P$ nog bij vergelijking (6) worden opgeteld. Het optimale preventieve interventie-interval is een interval waarvoor de verwachte gedisconteerde kosten over een oneindige tijdshorizon minimaal zijn.

5.2 Kostenoptimaal interventie-interval

In het navolgende zal de leeftijdvervangingsstrategie worden geïllustreerd aan de hand van een hypothetisch voorbeeld, waarbij de kosten van correctief vervangen tien keer zo groot zijn als de kosten van preventief vervangen: dat wil zeggen $c_F = 10$ miljoen gulden en $c_P = 1$ miljoen gulden. Er is verder een discontovoet aangenomen van 5% per jaar. Als levensduurverdelingen worden dezelfde kansverdelingen aangenomen als in figuur 3. Om hoge kosten van correctief vervangen te voorkomen is het in dit geval aantrekkelijk om preventief onderhoud uit te voeren. De vraag is alleen: Wanneer? In feite moet er een optimale balans worden gevonden tussen twee extreme, maar dure, onderhoudsstrategieën: zeer frequent vervangen (resultierend in zeer hoge kosten van preventief vervangen en zeer lage kosten van correctief vervangen) en niet preventief vervangen (resultierend in geen kosten van preventief vervangen en hoge kosten van correctief vervangen).



Figuur 5: Verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon bij een leeftijdvervangingsstrategie met kosten van correctief vervangen die tien keer zo groot zijn als de kosten van preventief vervangen. Van links naar rechts: a) bijna geen onzekerheid in de veroudering en b) grote onzekerheid in de veroudering.

Het economisch optimum zit tussen deze extreme onderhoudsstrategieën in. Omdat de kosten van correctief vervangen veel hoger zijn dan de kosten van preventief vervangen, mag er worden verwacht dat dit economisch optimum kleiner is dan het verwachte faaltijdstip van het objectonderdeel (circa 20 jaar). Het is immers economisch aantrekkelijk om falen zoveel mogelijk te voorkomen. Inderdaad zijn de verwachte gediscoteerde kosten - bij bijna geen en grote onzekerheid in de veroudering - minimaal voor een preventief interventie-interval van respectievelijk 19 en 11 jaar (zie figuur 5).

Wat betreft de relatie tussen de onzekerheid in het verouderingsproces en het kostenoptimale preventieve interventie-interval kan worden gesteld: hoe kleiner de onzekerheid in de veroudering (figuur 2), des te kleiner is de onzekerheid in het faaltijdstip (figuur 3) en des te beter kan preventief onderhoud worden gepland, en wel vlak vóórdat falen plaatsvindt (figuur 5). Bij bijna geen onzekerheid in de veroudering is het optimale

interventie-interval zodoende net iets kleiner dan de verwachte levensduur. Bij een grotere onzekerheid in de veroudering is het vaak optimaal om eerder tot preventief vervangen over te gaan (zie figuur 5).

Op basis van het optimale preventieve interventie-interval en de verwachte verouderings-snelheid kan vervolgens het optimale preventieve interventieniveau worden benaderd en wel met behulp van figuur 2. Het optimale interventieniveau is bij benadering gelijk aan de verwachte conditie aan het eind van het optimale interventie-interval. Bij een onzekerheid in de jaarlijkse veroudering van $\sigma = 5,6$ is het optimale interventieniveau dus gelijk aan de beginconditie (100%) minus de verwachte veroudering gedurende het optimale interventie-interval van 11 jaar ($11 \times 5 = 55\%$), ofwel 45%.

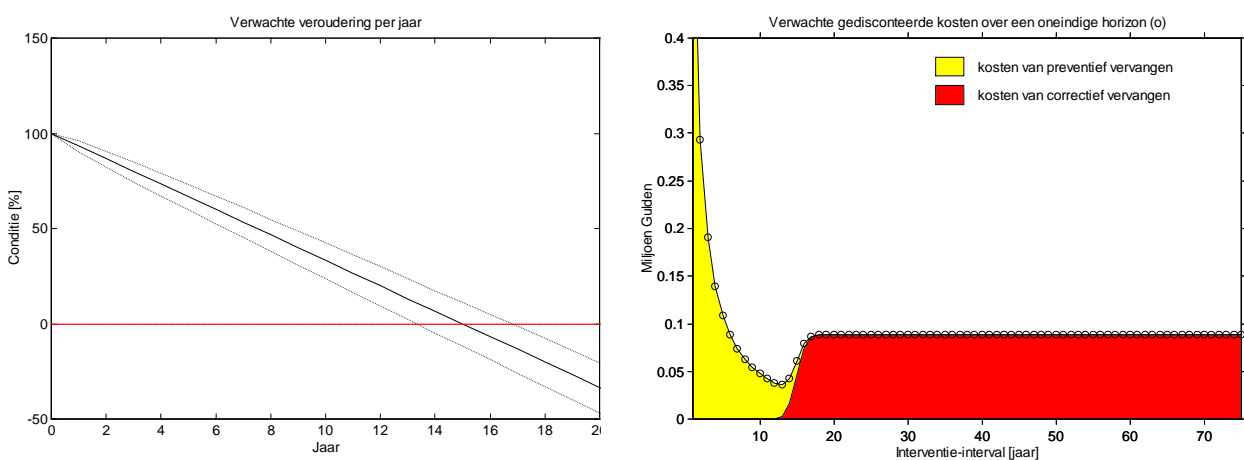
In de situatie dat de kosten van correctief vervangen even groot zijn als de kosten van preventief vervangen, is het daarentegen goedkoper om de vervangingskosten van een onderdeel zo lang mogelijk uit te stellen en wel tot het moment van falen. De verwachte gediscoteerde kosten zijn in dit geval minimaal voor een "oneindig groot" interventie-interval. Het extra risico dat wordt gelopen als een onderdeel faalt, is immers nihil. Ook economisch gezien is het aan te bevelen om een vervanging zo lang mogelijk uit te stellen: hoe later de bewuste vervanging plaatsvindt, des te kleiner zijn de verwachte gediscoteerde kosten. Er kan dus worden volstaan met storingsafhankelijk correctief onderhoud (vergelijk CUR, 1997, figuur 7.11).

Er zij wel opgemerkt dat er bij onderhoud op basis van interventieniveaus eigenlijk twee beslissingsvariabelen een rol spelen: (i) de inspectiefrequentie en (ii) het interventieniveau. Deze twee variabelen zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden: bij een hoge inspectiefrequentie kan worden volstaan met een interventieniveau dat dichtbij het faalniveau ligt, terwijl bij een lage inspectiefrequentie een interventieniveau hoort dat ver van het faalniveau verwijderd is. Verder zijn bij een kostenoptimalisatie niet alleen de kosten van preventieve of correctieve vervanging van belang, maar ook de kosten van inspectie. Hoe vaker er immers wordt geïnspecteerd, des te hoger zijn uiteraard de inspectiekosten, maar des te lager de faalkosten. Interventieniveaus, die zijn verkregen met behulp van het hierboven gepresenteerde onderhoudsmodel, zijn dan ook bij benadering kosten-optimaal. Indien het noodzakelijk is om ook inspecties in een kostenanalyse te betrekken, zal een uitgebreider model van toestandsafhankelijk preventief onderhoud moeten worden gebruikt (zie van Noortwijk, Kok & Cooke, 1997).

6. Voorbeeld: Onderhoud van opzetcilinders

Als vereenvoudigd voorbeeld zal het onderhoud aan een opzetcilinder van een bestaande draaibrug worden beschouwd. Bij een opzetcilinder bestaat preventief onderhoud voornamelijk uit het vervangen van de geleidebussen van zuigerstang en plunjer, alsmede het vervangen van de bekleding van de zuigerstang. In het geval van correctief onderhoud wordt de opzetcilinder in zijn geheel vervangen, omdat er door het uitblijven van preventief onderhoud te veel slijtage aan de cilinder is ontstaan. De kosten van preventief vervangen en correctief vervangen zijn, inclusief maatschappelijke gevolgkosten, respectievelijk gelijk aan circa $c_P = 30.000$ en $c_F = 100.000$ gulden. Bij beide vormen van onderhoud wordt de cilinder teruggebracht tot de oorspronkelijke staat. Wat betreft de veroudering van een opzetcilinder is aangenomen dat de functionele kwaliteit lineair in de tijd verloopt van een beginniveau van $r_0 = 100\%$ tot een faalniveau van $s = 0\%$. Deze veroudering is gebaseerd

op het regelmatig uitvoeren van levensduurverlengend onderhoud in de vorm van het schoonmaken van de cilinder en het aanbrengen van afdichtingen. Het tijdstip waarop de verwachte functionele kwaliteit gelijk is aan het faalniveau is 15 jaar verondersteld, met een jaarlijkse verwachte veroudering van $\mu = 6,67$ en een standaarddeviatie van $\sigma = 1,81$ (zie figuur 6). De verwachte gediscoteerde onderhoudskosten over een oneindige tijdshorizon (exclusief levensduurverlengingskosten) zijn berekend op basis van een discontovoet van $r = 5\%$ en zijn minimaal voor een preventief interventie-interval van 13 jaar (zie figuur 6). Het kostenoptimale preventieve interventieniveau is dus bij benadering gelijk aan het beginniveau van 100% minus de verwachte veroudering gedurende een interval van 13 jaar, ofwel $100\% - (13/15) * 100\% = 13\%$. Dit preventieve interventieniveau betreft een optimale afweging tussen de kosten van preventief vervangen enerzijds en de kosten van correctief vervangen anderzijds.



Figuur 6: Vervanging van opzetcilinders. Van links naar rechts: a) de verwachte veroudering met bijbehorende onzekerheid in de vorm van 90%-onzekerheidsintervallen en b) de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon bij een leeftijdvervangingsstrategie.

7. Conclusies

In deze casestudie is een probabilistisch onderhoudsmodel gepresenteerd waarmee het onderhoud van civieltechnische kunstwerken, rivierbodems en oevers kan worden geoptimaliseerd. Met het model kan een optimale kostenafweging worden gemaakt tussen preventief onderhoud (vóór falen) enerzijds en correctief onderhoud (ná falen) anderzijds. Een groot voordeel van dit model is dat verschillende onderhoudsstrategieën met elkaar kunnen worden vergeleken, terwijl rekening wordt gehouden met de onzekerheden in de veroudering en het faaltijdstip. Ook de invloed van rente en inflatie is in het model verwerkt door middel van een discontovoet. De resultaten van het onderhoudsmodel zijn kostenoptimale interventie-intervallen en interventieniveaus. In de ontwerpfase kan het onderhoudsmodel worden gebruikt om een optimale balans te vinden tussen de initiële investeringskosten enerzijds en de toekomstige onderhoudskosten anderzijds. Dit kan door middel van het bepalen van een ontwerpbeginconditie waarvoor de verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon minimaal zijn.

Dankwoord

Het gepresenteerde onderhoudsmodel is ontwikkeld in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat. De auteur is veel dank verschuldigd aan ir. H.E. Klatter, ir. H.J. van der Graaf, ir. J.D. Bakker, ir. E.E. Ariëns en ing. S. Fokkema.

Literatuur

- Ariëns, E.E., en J.M. van Noortwijk. Nieuwe beheer- en onderhoudsfilosofie Rijkswaterstaat; Multi-functionele benadering als uitgangspunt, *Land + Water*, 38(10):26-29, 1998.
- Barlow, R.E., en F. Proschan. *Mathematical Theory of Reliability*. Philadelphia: SIAM, 1996.
- CUR (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) en Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (Dienst Weg- en Waterbouwkunde en Bouwdienst). Kansen in de civiele techniek; Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie, CUR-Publicatie 190, Gouda, 1997.
- Feller, W. *An Introduction to Probability Theory and its Applications; Volume 1*. New York: John Wiley & Sons, 1950.
- Jorissen, R.E., & J.M. van Noortwijk. Instrumenten voor optimaal beheer van waterkeringen, *Het Waterschap*, 83(1):6-12 & 83(2):42-47, 1998.
- Karlin, S., en H.M. Taylor. *A First Course in Stochastic Processes*; Second Edition. San Diego: Academic Press, 1975.
- Kuijper, H.K.T. Onderhoud in de waterbouw. Afstudeerverslag, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, 1992.
- van Noortwijk, J.M. *Optimal Maintenance Decisions for Hydraulic Structures under Isotropic Deterioration*. Proefschrift, Faculteit der Technische Wiskunde en Informatica, Technische Universiteit Delft, 1996.
- van Noortwijk, J.M. Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration. In A.S. Nowak, editor, *Proceedings of the Eighth IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Kraków, Poland*, blz. 273-280. Ann Arbor: University of Michigan, 1998.
- van Noortwijk, J.M., en H.E. Klatter. Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier. *Reliability Engineering and System Safety*, 65:203-211, 1999.
- van Noortwijk, J.M., M. Kok en R.M. Cooke. Optimal maintenance decisions for the seabed protection of the Eastern-Scheldt barrier. In R. Cooke, M. Mendel en H. Vrijling, editors, *Engineering Probabilistic Design and Maintenance for Flood Protection*, blz. 25-56. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- van Noortwijk, J.M., en E.B. Peerbolte. Optimal sand nourishment decisions. *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, 126(1):30-38, 2000.
- van Noortwijk, J.M., en P.H.A.J.M. van Gelder. Optimal maintenance decisions for berm breakwaters. *Structural Safety*, 18(4):293-309, 1996.
- Ross, S.M. *Applied probability models with optimization applications*. New York: Dover Publications, 1970.
- Speijker, L.J.P., J.M. van Noortwijk, M. Kok en R.M. Cooke. Optimal maintenance decisions for dikes. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 14:101-121, 2000.
- Wagner, H.M. *Principles of Operations Research*; Second Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975.