

Instrumenten voor optimaal beheer van waterkeringen

gepubliceerd in:

Het Waterschap

jaargang 83, pag. 6-12 & pag. 42-47, 1998

Auteurs: R.E. Jorissen
J.M. van Noortwijk

ISBN 90-77051-02-3

Instrumenten voor optimaal beheer van waterkeringen

R.E. Jorissen¹ en J.M. van Noortwijk²

Naarmate de versterking van waterkeringen vordert, neemt de aandacht voor onderhoud alleen maar toe. Verschillende beheerders hebben alle noodzakelijke versterkingswerken inmiddels uitgevoerd en staan voor de taak de bereikte veiligheid zo efficiënt mogelijk te handhaven. De vijfjaarlijkse toetsing van de veiligheid is hierbij een belangrijk instrument. In de TAW-leidraad 'Toetsen op Veiligheid' worden de belangrijkste rekenregels voor deze veiligheidstoetsing gegeven. Ook in de ontwerpleidraden is de verschuiving van aanleg en verbetering naar onderhoud zichtbaar. Zo wordt in de binnenkort te verschijnen TAW-leidraad 'Zee- en Meerdijken' veel meer aandacht aan beheer geschonken dan in voorafgaande leidraden. Ook het onderzoek naar optimaal beheer van waterkeringen heeft de laatste jaren meer en meer de aandacht gekregen. Dit artikel geeft een beknopt overzicht van dit onderzoek en gaat dieper in op de ontwikkeling en toepassing van mathematische modellen voor de minimalisatie van beheerkosten.

¹ Onderzoekcoördinator Waterkeringen bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat, Postbus 5044, 2600 GA Delft.

² Adviseur risico-analyse en veiligheid, HKV LIJN IN WATER, Postbus 2120, 8203 AC Lelystad.

Inleiding

Vanwege het in toenemende mate gereed komen van de versterkte waterkeringen is de aandacht op dit moment aan het verschuiven van aanleg en versterking naar onderhoud. Met de bouw van de Maeslantkering is het Deltaplan uitgevoerd en zullen de versterkte zeedijken en grote kunstwerken als de Oosterscheldekering regelmatig moeten worden getoetst, beheerd en onderhouden. Ook zullen de rivierdijkversterkingen waarschijnlijk uiterlijk in het jaar 2000 voltooid zijn. Verder zijn de meeste Nederlandse waterbouwkundige kunstwerken aangelegd dan wel verbeterd vlak vóór of vlak na de Tweede Wereldoorlog. De onderhoudskosten van deze rijkskunstwerken zullen in de komende vijftig jaar naar verwachting worden verdubbeld. Een andere grote onderhoudspost is de kustlijnhandhaving. Volgens de tweede kustnota 'Kustbalans 1995' (Rijkswaterstaat, 1996) kunnen zeespiegelstijging en zand- en aardgaswinning er zelfs toe leiden dat kusterosie alleen dan doelmatig kan worden bestreden als de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand nagenoeg wordt verdubbeld.

Om te kunnen anticiperen op de grote toename in de benodigde beheerinspanningen zijn door Rijkswaterstaat diverse nota's opgesteld, zoals 'Beheer op Peil' (Rijkswaterstaat, 1997) en 'Kustbalans 1995' (Rijkswaterstaat, 1996). 'Beheer op Peil' gaat over het opstellen van zogenoemde regionale BeheersPlannen Nat (BPN) voor het beheren van de natte infrastructuur zoals bruggen, sluisen, stuwen, waterkeringen, bodems en oevers, alsmede het kwaliteitsbeheer van water en de inpassing van landschappelijke, natuur en cultuurhistorische waarden (LNC-waarden). 'Kustbalans 1995' gaat nader in op het dynamisch handhaven van de kustlijn door middel van van voornamelijk zandsuppleties.

Om beheer en onderhoud zo goed mogelijk te kunnen plannen en uitvoeren, spelen gegevens uiteraard een belangrijke rol. Zo dient er een inspectieplan en -instrumentarium beschikbaar te zijn (b.v. in de vorm van de hoogte- en dieptemetingen van kustprofielen). De zo verkregen meetgegevens moeten vervolgens gestructureerd worden opgeslagen in een technisch beheersregister. In zo'n register staat de actuele toestand van elke waterkering aangegeven in de vorm van situatietekeningen, dwars- en lengteprofielen en andere voor het behoud van het waterkerend vermogen kenmerkende gegevens. Deze actuele toestand dient vervolgens te worden getoetst tegen de vereiste toestand van de waterkeringen. Parallel aan de toetsing kan ook worden bekeken of de vigerende legger nog aan de eisen voldoet. In de legger zijn o.a. de vastgestelde vereiste afmetingen van de waterkering opgenomen. Deze vastgestelde eisen kunnen door veranderde inzichten of hydraulische belastingen zijn achterhaald.

Om zowel het technisch beheersregister als de legger onder te kunnen brengen in een geautomatiseerd informatiesysteem is door het hoogheemraadschap van de Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden en de Technische Universiteit Delft het zogenoemde GISWAK ontwikkeld [zie Vonk & Van de Looij (1996)]. Hierbij wordt samengewerkt met een aantal andere hoogheemraadschappen en waterschappen. Bij de ontwikkeling van dit geografisch informatiesysteem ten behoeve van waterkeringenbeheer vormen de Wet op de waterkering (1996), de provinciale model-verordening en het ter zake uitgebrachte Uniemodel (de zogenoemde 'Gegevensstandaard Water' van de Unie van Waterschappen) belangrijke uitgangspunten. Andere voorbeelden van geautomatiseerde informatiesystemen ten behoeve van beheer zijn het DIJK-GIS, het Data-Informatie-Systeem Kunstwerken (DISK) en de - in ontwikkeling zijnde - Technische InformatieSystemen Beheer en Onderhoud (TISBO). Voor de kustlijnhandhaving is er het zogenoemde JARKUS-bestand, met daarin kustprofielmetingen die moeten worden vergeleken met de gewenste kustlijn (de zogenoemde Basiskustlijn). Indien er - naast de actuele toestand - óók informatie beschikbaar is over de in de toekomst te verwachten toestand, dan kan beheer en onderhoud zodanig worden gepland dat de bijbehorende kosten zo klein mogelijk zijn.

Methodieken om onderhoudskosten te minimaliseren zijn reeds in het begin van de jaren zestig ontwikkeld voor het onderhoud van werktuigbouwkundige en elektrotechnische onderdelen van vliegtuigen, computers, raketten, enz. In deze gevallen werd en wordt er echter vaak vanuit gegaan dat een onderdeel slechts in twee toestanden kan verkeren, namelijk "gefaald" en "niet gefaald". Een nadeel is dat er bij het regelmatig

Veiligheid

De vereiste veiligheid van primaire waterkeringen is in belangrijke mate bepaald door het rapport van de Deltacommissie (1960). Direct na de stormvloedramp van 1953 is deze commissie ingesteld. Op basis van de aanbevelingen van deze commissie werd de kustlijn van Zuid-West Nederland aanzienlijk verkort en is tegelijk een meer wetenschappelijke benadering voor het ontwerpen van waterkeringen gekozen. De ontwerpmethodes van waterkeringen werd door de meer wetenschappelijke benadering aanzienlijk verbeterd. De tot dan toe gebruikelijke benadering voor het ontwerpen van waterkeringen was in belangrijke mate gebaseerd op de hoogst bekende waterstand. Ten opzichte van deze waterstand werd een zekere marge (0,5 tot 1,0 meter) gehanteerd. De Deltacommissie beval aan uit te gaan van een zeker gewenst veiligheidsniveau. Dit veiligheidsniveau zou gebaseerd moeten zijn op een afweging van kosten voor aanleg van waterkeringen en mogelijke schade bij een overstroming.

Door de Deltacommissie is een econometrische analyse uitgevoerd voor het dijkringgebied Centraal-Holland. Dit gebied is één van de drie-en-vijftig Nederlandse dijkringgebieden, die tegen overstroming worden beschermd door een ring van duinen, dijken, bijzondere waterkerende constructies en hoge gronden (zie Figuur 1). Centraal-Holland (dijkringgebied 14) was en is, qua economie en qua bewonersaantallen, een van de meest belangrijke dijkringgebieden. Op basis van de gegevens van 1956 heeft deze econometrische analyse geleid tot een optimaal veiligheidsniveau van $8 \cdot 10^{-6}$ per jaar [Van Dantzig (1956) en Deltacommissie (1960)]. Dit getal staat voor de in econometrische zin optimale faalkans van de dijkring. Bij deze analyse is het verlies aan mensenlevens en andere waarden niet meegenomen.

Gezien de beschikbare technische mogelijkheden is deze veiligheidsbenadering destijds niet volledig gecomplementeerd. Met name de kans op het doorbreken van een waterkering en dus de kans op een overstroming bleek niet voldoende nauwkeurig in te schatten. Ook bleek de mate van correlatie tussen de verschillende faalmechanismen een nog onoplosbaar probleem. Daarom is gekozen voor een vereenvoudigde veiligheidsbenadering, gebaseerd op ontwerpbelastingen. Het uitgangspunt hierbij is dat elk individueel dijkvak voldoende hoog moet zijn om een bepaalde extreme waterstand met bijbehorende golfbelasting veilig te keren. Hiermee wordt het mechanisme overlopen of golfoverslag in voldoende mate voorkomen. Door aanvullende constructieve eisen, zoals de helling van het binnentalud en zwaarte van de bekleding, wordt een voldoende stabiliteit bewerkstelligd. De faal- of bezwijkkans van de waterkering is hiermee echter niet bepaald. Deze veiligheidsbenadering wordt dan ook de overbelastingsbenadering genoemd.

De te keren extreme waterstand heeft voor Centraal-Holland een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar. Dit ontwerp criterium is gebaseerd op de enorme gevolgen van een overstroming veroorzaakt door hoge waterstanden op de Noordzee. Voor de economisch minder belangrijke gebieden is de ontwerpwaterstand gebaseerd op hogere overschrijdingsfrequenties. In aanvulling op het werk van de Deltacommissie is de gewenste veiligheid van de dijken langs de rivieren Rijn en Maas vastgesteld. Door de geringere schade bij overstromingen tengevolge van hoge rivierafvoeren is de ontwerpwaterstand in het bovenrivierengebied vastgesteld op de waterstand behorend bij een overschrijdingsfrequentie van 1/1.250 per jaar. Voor elk te beschermen dijkringgebied is op deze wijze een veiligheidsniveau in de vorm van ontwerpwaterstanden vastgelegd.

Toetsing

Op basis van de genoemde veiligheidseisen zijn de laatste 40 jaar veel waterkeringen versterkt. Langs de Noordzeekust is die versterking vrijwel voltooid. De rivierdijkversterking is na het hoogwater van 1995 in een stroomversnelling terecht gekomen. Het beveiligingsniveau dat wordt bereikt met de voltooiing van de deltawerken en de versterking van de overige waterkeringen dient te worden gehandhaafd. Bij deze handhaving moet worden bedacht dat het beveiligingsniveau op verschillende manieren al dan niet sluipend wordt verminderd: veroudering van de constructie en verandering in omgevingsfactoren (zoals zeespiegelstijging en bodemdaling). De Wet op de waterkering (1996) schrijft een vijfjaarlijkse toetsing voor

van de primaire waterkeringen, waarin de per dijkkringgebied aanwezige veiligheid tegen overstroming wordt getoetst aan de wettelijke norm.

De toetsing van de veiligheid van de waterkering bestaat uit het vergelijken van de aanwezige sterkte met de relevante hydraulische randvoorwaarden (ontwerpbelasting). Toetsen op veiligheid is hiermee - voor een deel - anders dan ontwerpen of beoordelen van het beheer. Een *ontwerper* gaat meestal uit van een blanco situatie en zoekt voor een langere periode een optimum voor kosten van aanleg en beheer, afgestemd op de verschillende te vervullen functies. De *toetsers* is minder veeleisend. Zolang de veiligheid (waterkerende functie) van een waterkering is gewaarborgd, mag er 'van alles' mis gaan. Hierdoor kan een ontwerpvoorschrift of beheersbeoordeling andere eisen opleveren dan een veiligheidstoetsing. Bij de veiligheidstoetsing zal de beheerder op basis van zijn kennis en ervaring het te verwachten gedrag van de waterkering onder extreme omstandigheden beoordelen en vertalen in een veiligheidsscore.

In de TAW-leidraad 'Toetsen op Veiligheid' (1996) zijn de rekenregels voor de toetsing opgenomen. Enerzijds sluiten deze rekenregels aan bij de ontwerpcriteria uit de andere TAW-leidraden, anderzijds bieden zij de toetsers de nodige ruimte. Door de Deltacommissie is in 1960 voor de beveiliging tegen stormvloed een norm geadviseerd in de vorm van een overschrijdingsfrequentie van een waterstand. Bij die waterstand moet de waterkering nog 'volledig veilig' zijn. Dit in principe onmogelijke criterium is door de Deltacommissie vertaald in een aantal ontwerpcriteria, zoals de 2%-golfoploop. Deze criteria vormen de basis voor de latere ontwerpleidraden en voor de toetsingscriteria.

Het voorgaande betekent dat de bij het ontwerpen van waterkeringen aangehouden sterkte (= ontwerpsterkte) zodanig ruim is, dat er bij een iets hogere belasting of iets geringere sterkte niet direct sprake zal zijn van een voor de veiligheid onacceptabele situatie (= begin fysiek falen of bezwijken). Bij het afleiden van de toetscriteria is gezocht naar toestanden, waarbij een zodanige overbelasting van essentiële waterkeringonderdelen optreedt dat een onaanvaardbaar risico ontstaat voor de standzekerheid van de waterkering als geheel (= begin fysiek falen of bezwijken). Op basis van de criteria voor 'begin fysiek falen' en 'ontwerpsterkte' kan de sectie van een waterkering worden gewaardeerd.

Een sectie van de waterkering scoort 'goed' indien de sterkte groter dan of gelijk is aan de ontwerpsterkte. De waterkering is dan veilig. De rekenregels voor de ontwerpsterkte zijn in principe de regels afkomstig uit de bekende TAW-leidraden voor het ontwerpen van waterkeringen. Een sectie van de waterkering scoort 'onvoldoende' indien de sterkte geringer is dan die overeenkomend met het criterium voor 'begin fysiek falen'. De waterkering is dan onveilig en maatregelen zijn noodzakelijk.

Als de sterkte tussen 'goed' en 'onvoldoende' in ligt, dan wordt de waardering 'voldoende' gegeven. De waterkering is dan niet onveilig. De waardering 'voldoende' wordt alleen toegekend in die gevallen, waarin de geaccepteerde kennis voldoende is om het traject tussen 'ontwerpsterkte' en 'begin fysiek falen' te kunnen definiëren en ingrijpen met minimaal 5 jaar uit te kunnen stellen. Met nadruk wordt erop gewezen dat het criterium 'begin fysiek falen' niet mag worden gebruikt voor ontwerpdoeleinden bij aanleg, verbetering of variabel onderhoud.

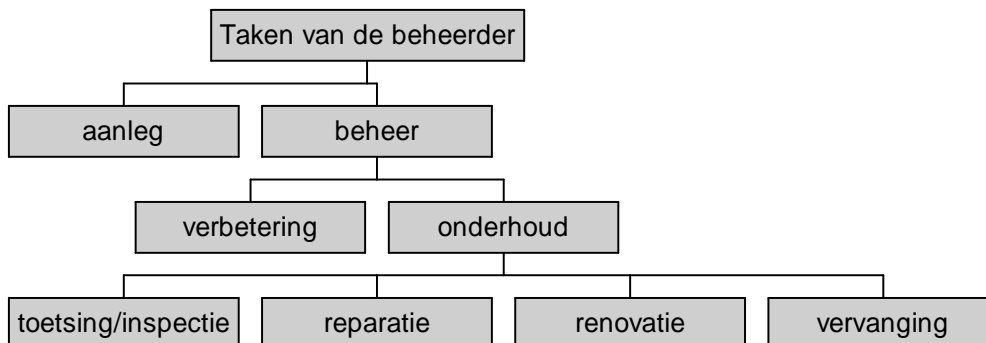
Bij het opstellen van de eerste leidraad 'Toetsen op Veiligheid' is veel inspanning gestoken in het compleet en consistent krijgen van de toetsregels. Voor elk type waterkering en elk faalmechanisme zijn rekenregels opgesteld, waarbij met name de grens tussen 'voldoende' en 'onvoldoende' een steeds terugkerend discussiepunt is geweest. De leidraad is - zoals de titel ook aangeeft - mono-functioneel; bij de toetsing gaat het alleen om de veiligheid.

Beheer

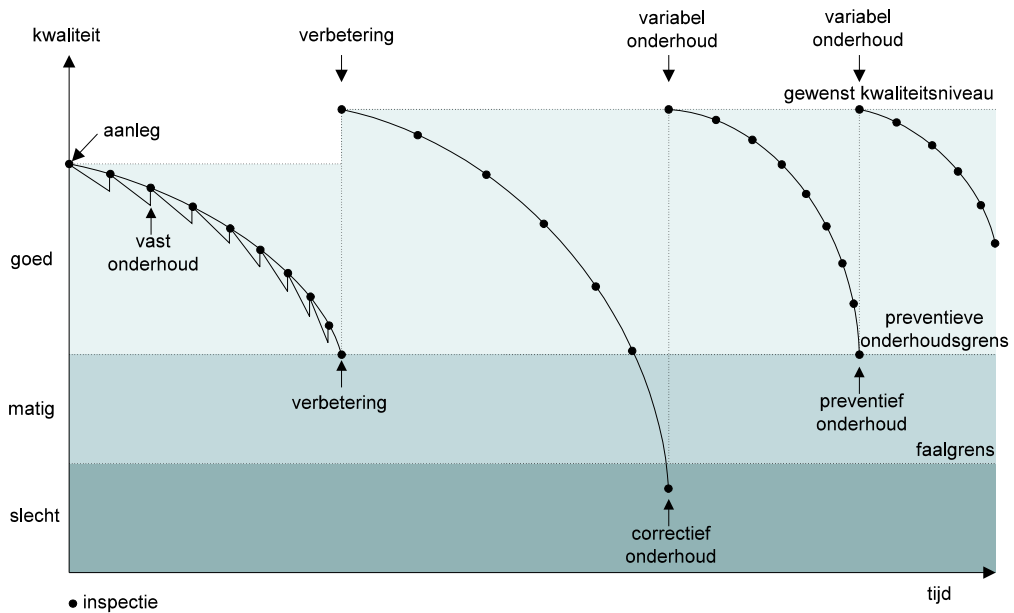
Om de veiligheid van dijkkringgebieden voldoende te kunnen waarborgen, moeten waterkeringen worden aangelegd, beheerd, verbeterd en onderhouden (zie Figuur 2). Waterkeringen vervullen over het algemeen meer dan één functie. Te denken valt hierbij aan de functies veiligheid, natuur, landschap, recreatie, scheepvaart, verkeer, landbouw en visserij. Het doel van beheer en onderhoud is nu om ervoor te zorgen dat een waterkering zodanig aan zijn functies voldoet dat de functionele kwaliteit ervan 'goed' is.

Als een waterkering niet meer of onvoldoende voldoet aan zijn belangrijkste functies, dan is er sprake van zogeheten falen. Aangezien falen in de waterbouwkunde meestal hoge kosten met zich meebrengt, zal falen zo veel mogelijk moeten worden voorkomen door middel van preventief onderhoud. Er zijn ruwweg twee manieren van falen te onderscheiden: (i) normfalen bij het overschrijden van een van te voren vastgestelde faalnorm of veiligheidsnorm (in het geval dat de kruinhoogte van een dijk kleiner is dan de maatgevende hoogwaterstand) en (ii) fysiek falen bij het daadwerkelijk bezwijken (in het geval dat de kruinhoogte van een dijk kleiner is dan de actuele waterstand). Faal- en veiligheidsnormen worden vanuit het beleid vastgesteld, om grote maatschappelijke risico's in de vorm van slachtoffers en overstromingsschade te voorkomen. Door het handhaven van deze normen kunnen eventuele maatschappelijke kosten sterk worden verlaagd.

Beheer omvat het geheel van maatregelen in de sfeer van verbetering en onderhoud [zie Figuur 2 en 3, alsmede Gijsbers (1987)]. Hierbij is onderhoud gedefinieerd als het totaal van activiteiten, waarmee de functionele kwaliteit van een waterkering of een onderdeel ervan wordt teruggebracht tot het gewenste kwaliteitsniveau (zoals b.v. is beschreven in een legger). Mogelijke onderhoudsmaatregelen zijn toetsingen/inspecties, reparaties, renovaties en vervangingen. Een verbeteringswerk verschilt van onderhoud in die zin dat een verbetering altijd een verhoging van het gewenste kwaliteitsniveau betreft (zoals b.v. bij een leggerwijziging). De oorzaak kan een wijziging in de ontwerprandvoorwaarden zijn.



Figuur 2: De taken van de beheerder.



Figuur 3: De functionele kwaliteit (sterkte) van een waterkering met preventieve onderhoudsgrens en faalgrens.

Globaal zijn er twee typen onderhoud te onderscheiden, namelijk *correctief onderhoud* (ná falen) en *preventief onderhoud* (vóór falen). Correctief onderhoud is te prefereren boven preventief onderhoud in het geval van lage faalkosten (zoals bij het verwisselen van een gloeilamp). Preventief onderhoud verdient daarentegen de voorkeur in het geval van hoge faalkosten (zoals bij het ophogen van een dijk, het baggeren van een rivierbodem en het suppleren van zand aan de kust). Het beslissingsdiagram voor de keuze tussen preventief en correctief onderhoud is weergegeven in Figuur 4.

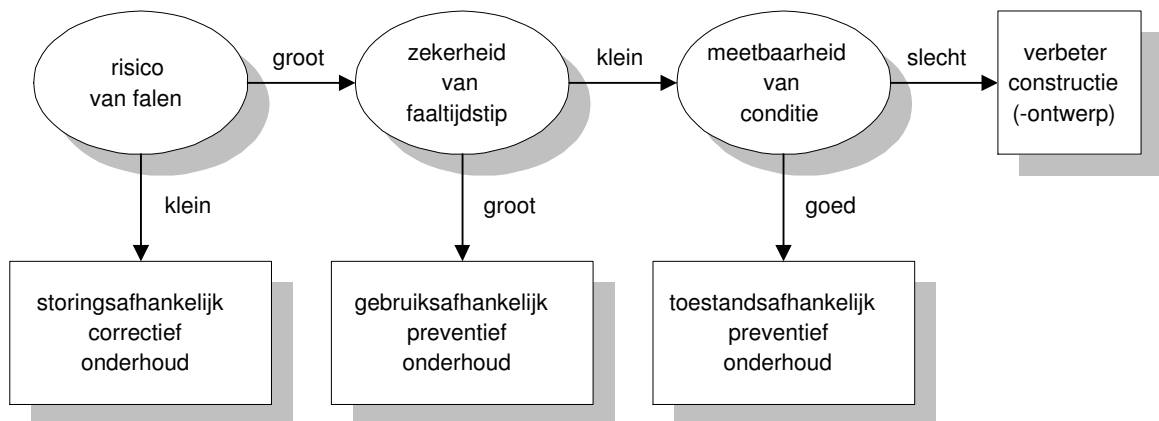
Naast het verschil tussen correctief en preventief onderhoud kan nog onderscheid worden gemaakt tussen *variabel onderhoud* en *vast onderhoud* (zie ook Figuur 3).

Variabel onderhoud bestaat uit maatregelen, waarbij de oorspronkelijke toestand van de waterkering wordt hersteld door repareren, renoveren en/of vervangen. De oorspronkelijk door de waterkering te vervullen functies veranderen dus niet. Variabel onderhoud wordt onder andere veroorzaakt door zetting van een dijk of erosie van de bekleding. Variabel onderhoud en verbeteringswerken worden door de veiligheidstoetsing geïnitieerd indien de resultaten van de toetsing daartoe aanleiding geven.

Onder het *vaste onderhoud* (of levensduurverlengend onderhoud) wordt het regelmatige - b.v. jaarlijkse - onderhoud verstaan. Deze regelmatige kleinschalige activiteiten worden niet door de veiligheidstoetsing geïnitieerd. Door vast onderhoud kan de veroudering worden vertraagd, falen worden uitgesteld en de levensduur zodoende worden verlengd. Het maaien van de grasbekleding van dijken en het conserveren van sluisdeuren valt in de categorie vast onderhoud.

Preventief onderhoud kan verder worden onderverdeeld in:

- *tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud*, dat wordt uitgevoerd na een vaste leeftijd, gebruiksduur of belasting (zoals bij het ververset van olie bij elke 15.000 km-beurt van een auto), en
- *toestandsafhankelijk preventief onderhoud*, dat wordt uitgevoerd op basis van het inspecteren van de toestand, conditie of functionele kwaliteit van het onderdeel (zoals bij de vijfjaarlijkse veiligheidstoetsing en bij het inspecteren van de bodemverdediging van de Oosterscheldekering).



Figuur 4: Beslissingsdiagram voor de keuze tussen preventief en correctief onderhoud.

Tijds-, gebruiks- of belastingsafhankelijk preventief onderhoud kan worden toegepast als het faaltijdstip vrij goed kan worden voorspeld, terwijl toestandsafhankelijk preventief onderhoud kan worden toegepast als de toestand van het te onderhouden objectonderdeel kan worden geïnspecteerd (zie Figuur 4). In de waterbouwkunde zijn de consequenties van het falen van constructies of onderdelen daarvan over het algemeen zo groot dat onderhoud vrijwel altijd preventief is. Voor de handhaving van de veiligheid van waterkeringen is toestandsafhankelijk preventief onderhoud gekozen.

In het geval van toestandsafhankelijk preventief onderhoud kunnen zich drie mogelijkheden voordoen (zie Figuur 3):

1. de conditie of kwaliteit is '*goed*': er hoeft niets te worden gedaan (de conditie heeft de preventieve onderhoudsgrens nog niet overschreden);
2. de conditie of kwaliteit is '*matig*': er moet preventief onderhoud worden uitgevoerd (de conditie heeft wel de preventieve onderhoudsgrens overschreden, maar nog niet de normfaalgrens) en
3. de conditie of kwaliteit is '*slecht*': er moet correctief onderhoud worden uitgevoerd als gevolg van falen (de conditie heeft de normfaalgrens overschreden).

Er zij opgemerkt dat het bij een preventieve onderhoudsstrategie in principe toch kan voorkomen dat correctief onderhoud moet worden uitgevoerd; de kans hierop is evenwel klein, maar hoeft zeker niet gelijk te zijn aan nul.

Aangezien falen bij waterkeringen is gedefinieerd als het niet voldoen aan functie-eisen, heeft een waterkering bij falen overigens nog *niet* te bezwijken. Een dijk overstroomt, bezwijkt en/of breekt immers pas echt door als er naast falen ook nog eens een extreem hoogwater optreedt! Bij het beschouwen van eventuele faalkosten moeten idealiter dan ook zowel de kans op extreme hoogwaters als de overstromingsschade in een kostenanalyse worden betrokken. Omdat overstromingsschade de schade betreft

in een dijkkringgebied kunnen deze kosten pas echt goed worden bepaald in het kader van een toekomstige veiligheidsbenadering, gebaseerd op inundatierisico's.

Voorbeeld: toetsing van de Oostmolendijk volgens de leidraad

Zoals eerder vermeld, is voor de handhaving van de veiligheid van waterkeringen gekozen voor toestandsafhankelijk preventief onderhoud. Deze keuze is in de leidraad 'Toetsen op Veiligheid' verder uitgewerkt. De wettelijk vereiste sterkte van de waterkering is als uitgangspunt gehanteerd bij het afleiden van de benodigde criteria voor het uitvoeren van preventief onderhoud. Correctief onderhoud is verder buiten beschouwing gelaten. Er geldt een vast inspectie-interval van 5 jaar.

Bij wijze van voorbeeld zal het ophogen van de Oostmolendijk tussen Ridderkerk en Hendrik-Ido-Ambacht worden bestudeerd [ontleend aan Speijker (1994) en Van Noortwijk (1996a)]. Kenmerkend voor dit dijkvak van 1 km, dat deel uitmaakt van de dijkkring IJsselmonde (dijkkringgebied 17: zie Figuur 1), is de extreme kruinhoogtedaling. Deze kruinhoogtedaling is een combinatie van zetting, samendrukking van de ondergrond en relatieve zeespiegelstijging en bedroeg in de periode 1969-1981 maar liefst 60 cm en in de periode 1981-1989 circa 15 cm. Direct na de voorlaatste ophoging in 1969 was de kruinhoogte circa 5,20 m +NAP. Vlak voor de laatste ophoging in 1991 was de dijk inmiddels gezakt tot 4,60 m +NAP, waarna de dijk is opgehoogd tot circa 4,90 m +NAP. Het verschil tussen de kruinhoogtes van 1969 en 1991 heeft overigens te maken met de veranderde hydraulische randvoorwaarden ten gevolge van de bouw van de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg. Met een maaiveld van 1 m +NAP was de dijkhoogte in 1969 en 1991 dus gelijk aan respectievelijk 4,20 en 3,90 m. Het bestudeerde dijkvak is op de kruin 7 m breed met taluds onder een helling van 1:3.

In Figuur 5 is de veiligheid van de Oostmolendijk - in de vorm van de kerende hoogte van de dijk - met de scores 'goed' en 'onvoldoende' weergegeven. Tevens is in de figuur te zien hoe voor dit faalmechanisme de vereiste sterkte en de aanwezige sterkte onder invloed van de tijd (als gevolg van zetting en relatieve zeespiegelstijging) veranderen.

Voor de komende 50 jaar wordt een kruinhoogtedaling verwacht van ongeveer 1,30 m, waarvan 1,00 m is toe te schrijven aan zakking van de dijk zelf en 0,30 m aan relatieve zeespiegelstijging. Ter illustratie van het toetsingsproces en de resultaten ervan kan de toestand van de Oostmolendijk in 1991 en de verwachte ontwikkeling met de huidige leidraad 'Toetsen op Veiligheid' worden beoordeeld.

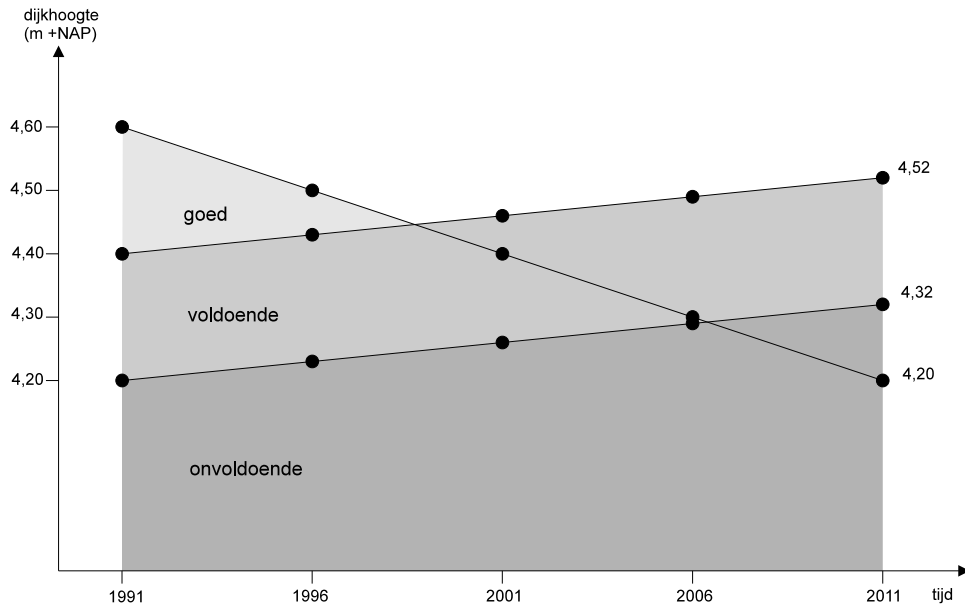
Bij deze toetsing zijn de volgende gegevens gebruikt:

- Maatgevend HoogWater (MHW) = 3,25 m +NAP
- benodigde waakhoogte volgens ontwerpleidraad = 1,15 m
- kruinhoogte 1991 (voor ophoging) = 4,60 m +NAP
- relatieve zeespiegelstijging = 60 cm/eeuw = 3 cm per toetsinterval van 5 jaar³
- zetting = 10 cm per toetsinterval van 5 jaar.

De toetsing wordt uitgevoerd in 1991 (voor de ophoging) en is voor de periode 1991-1996 geldig. Er wordt dus gerekend met de waarde van MHW inclusief zeespiegelrijzing voor 5 jaar. Voor de aanwezige kruinhoogte en zakking geldt in feite hetzelfde.

De grens tussen 'goed' en 'onvoldoende' wordt door de ontwerpleidraden gemarkeerd. Een aanwezige waakhoogte van 1,15 meter of meer leidt dus tot de score 'goed'. Terwille van de vergelijking wordt verondersteld dat de grens tussen 'voldoende' en 'onvoldoende' ligt bij een waakhoogte van 0,95 meter.

³ De waarde voor relatieve zeespiegelstijging (60 cm/eeuw) is niet afkomstig uit het voor de toetsing te gebruiken randvoorwaardenboek, maar is volgens het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) de meest waarschijnlijke waarde. Voor de relatief hoge waarde voor relatieve zeespiegelstijging is gekozen omwille van de vergelijking met eerdere studies, waarin van dit voorbeeld gebruik is gemaakt.



Figuur 5: De kerende hoogte van de Oostmolendijk en de waarderings volgens de leidraad 'Toetsen op Veiligheid'.

De benodigde kruinhoogte voor een score 'goed' bedraagt 4,43 m +NAP. De aanwezige kruinhoogte bedraagt, rekening houdend met zetting, 4,50 m +NAP. De kerende hoogte van deze dijk scoort dus in 1991 nog 'goed' en die score is geldig tot en met 1996.

Naar verwachting zal bij een toetsing in 1996 de score nog slechts 'voldoende' zijn omdat de benodigde kruinhoogte voor een score 'goed' dan 4,46 m +NAP bedraagt en de aanwezige kruinhoogte 4,40 m +NAP is. Voor een score 'voldoende' kan worden volstaan met een kruinhoogte van 4,26 m +NAP.

Bij de toetsing in 1996 kan de beheerder op basis van de gegevens en veronderstellingen aangeven dat bij de toetsing in 2001 de score nog steeds voldoende zal zijn (benodigd 4,29 m +NAP, aanwezig 4,30 m +NAP) en dat in 2006 de score 'onvoldoende' wordt verwacht (benodigd 4,32 m +NAP, aanwezig 4,20 m +NAP). Afhankelijk van andere omstandigheden (toestand aangrenzende waterkeringen, verlies van andere functies) zal de beheerder op grond van deze enkele toetsing ergens tussen 2001 en 2006 besluiten de waterkering te verhogen. Bij een ontwerp van de nieuwe waterkering in 2006 zal bij een planperiode van 50 jaar de benodigde kruinhoogte 5,79 m +NAP ($4,49 + 1,30 = 5,79$) bedragen.

Volgens de leidraad 'Toetsen op Veiligheid' kunnen onderhoudsmaatregelen overigens ook andere functies dan waterkeren dienen, die in het kader van het integrale waterkeringsbeheer zijn vastgesteld, op het gewenste niveau te brengen. In de leidraad wordt dan gesproken over herstel. Deze ingrepen worden niet geïnitieerd door de veiligheidstoetsing, maar kunnen in sommige gevallen wel degelijk profiteren van maatregelen ter verbetering van de waterkerende functie. Zo kan bij een dijkversterking tegelijk de weg op de kruin van de dijk worden verbeterd of kan juist de natuurfunctie worden versterkt.

Zoals hiervoor reeds is toegelicht, wordt beheer geïnterpreteerd als multi-functioneel beheer. De veiligheidstoetsing is daarentegen een onderdeel van beheer dat gericht is op de veiligheidsfunctie alleen. Het beoordelen en optimaliseren van multi-functioneel beheer is een bijzonder complexe zaak, mede gezien het soms onvergelykbare karakter van de verschillende functies. De huidige ontwikkeling van wiskundige optimalisatietechnieken is voornamelijk gericht op de veiligheidsfunctie alleen, waarbij telkens een enkel faalmechanisme c.q. herstelmaatregel kan worden bekeken. Samenhang tussen de verschillende

faalmechanismen en tussen de verschillende herstelmaatregelen is nog niet geïmplementeerd, evenmin als het multi-functionele karakter.

Minimalisatie van onderhoudskosten

Voor het onderhoud van waterkeringen is het van belang om de functionele kwaliteit van waterbouwkundige constructies te waarborgen, en wel het liefst tegen zo laag mogelijke kosten. De vraag die hierbij moet worden beantwoord is "op welke wijze kan onderhoud worden uitgevoerd opdat de functionele kwaliteit van een waterkering kan worden gehandhaafd en de verwachte onderhouds- en faalkosten minimaal zijn". Recent ontwikkelde wiskundige onderhoudsoptimalisatiemodellen kunnen de beheerder hierbij ondersteunen.

De levenscyclus van een waterkering kan globaal worden ingedeeld in vier fasen, namelijk ontwerp, aanleg, gebruik en vervanging. Aangezien het optimaliseren van onderhoud het meest economisch is in de ontwerpfase en in de gebruiksfase, zullen we ons in dit artikel tot deze twee fasen beperken. Analoog aan de manier waarop de Deltacommissie het optimale veiligheidsniveau voor Centraal-Holland heeft bepaald, is een optimale onderhoudsbeslissing gedefinieerd als een beslissing waarvoor de verwachte kosten minimaal zijn. Hierbij worden de verwachte kosten bepaald met betrekking tot de onzekerheid in de veroudering en het faaltijdstop.

Aangezien veroudering (of functieverlies) onzeker is, kan zij het beste worden beschouwd als een zogenoemd 'stochastisch proces'. Op het eerste gezicht lijkt het mogelijk om de onzekerheid in de kruinhoogtedaling te representeren met behulp van een kansverdeling die symmetrisch is om het gemiddelde (de zogenoemde 'normale verdeling'). Deze frequentieverdeling heeft de vorm van een "klokje" en 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 kruinhoogte van een dijk echter afwisselend toenemen of afnemen, net zoals bij de koerswaarde van een aandeel, waardoor het niet geschikt is om kruinhoogtedaling van een dijk te beschrijven. Zo is er bij een normaalverdeelde kruinhoogtedaling van een dijk een theoretische kans dat een dijk spontaan omhoog komt, hetgeen in de praktijk uiteraard niet gebeurt.

Om te bewerkstelligen dat in het verouderingsmodel geen verbetering kan optreden, is het aan te bevelen om de onzekerheid in de kruinhoogtedaling te modelleren met behulp van een zogenoemd 'gamma-proces'. Indien de kruinhoogtedaling van een dijk wordt beschouwd als een gamma-proces, dan zal een dijk - zoals gewenst - inderdaad alleen zakken! Naast het niet kunnen optreden van een spontane verbetering is het kenmerkend voor een gamma-proces dat veroudering - gedurende hele kleine tijdstapjes - enigszins 'spronggewijs' verloopt. Aangezien veroudering veelal een gevolg is van de op de waterkering uitgeoefende belasting, die varieert in de tijd (zoals bij golfploop/golfoverslag of verkeer op een dijk), sluit dit meestal vrij goed aan bij de fysica van het verouderen en falen van een waterkering. Verder is een bijkomend voordeel van het modelleren van veroudering door middel van een gamma-proces dat de berekeningen relatief eenvoudig zijn. Er kunnen zodoende allerlei onderhoudsmodellen op maat worden gemaakt voor diverse waterkeringen als duinen, dijken, dammen, golfbrekers, sluisen, stormvloedkeringen, rivierbodems, enz. [zie Kuijper (1992) en Van Noortwijk (1996a, 1996b)].

Wat betreft de onzekerheden in de initiële dijkhoogte en de faalgrens zij het volgende opgemerkt. Aangezien de onzekerheid in de beginsterkte meestal veel kleiner is dan de onzekerheid in de veroudering, kan de onzekerheid in de beginsterkte worden verwaarloosd. Verder is de faalgrens vaak een afspraak in de vorm van een van te voren vastgestelde normgrens of veiligheidsnorm, waardoor ook de faalgrens vast mag worden verondersteld.

Voorbeelden van stochastische verouderingsprocessen, die met behulp van een gamma-proces kunnen worden gemodelleerd, zijn: de structurele achteruitgang van de kustlijn, de kruinhoogtedaling van een dijk, het 'langs-transport' van stenen bij een dynamisch-stabiele golfbreker, de ontwikkeling van ontgrondingskuilen, de verplaatsing van stortsteen als gevolg van extreme stroming en de aanslibbing van een rivierbodem [zie Van Noortwijk (1996a, 1996b)].

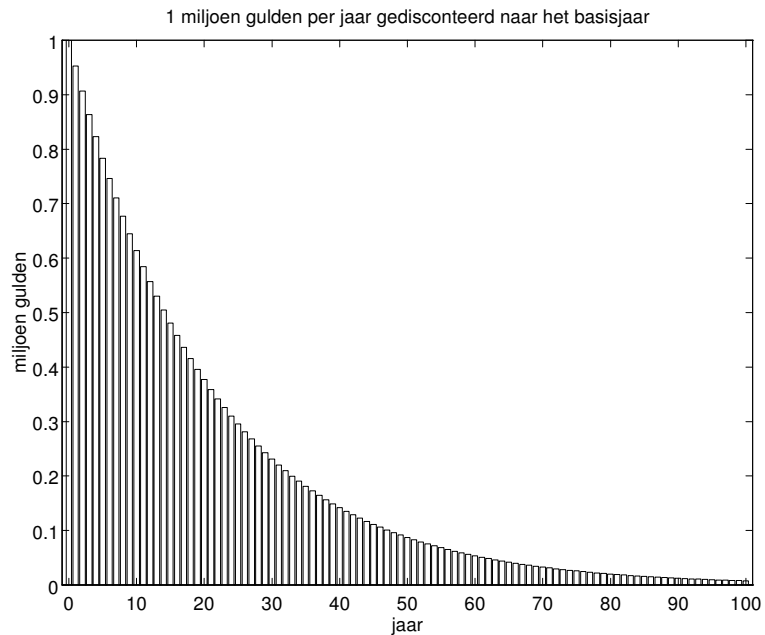
Op basis van een stochastisch verouderingsproces kan vervolgens worden uitgerekend hoe groot de kans op falen per jaar is (d.w.z. hoe groot de kans is dat de functionele kwaliteit in een bepaald jaar beneden de faalgrens zakt). Zo kunnen onderhoudsmodellen ons tevens van dienst zijn bij het schatten van de veiligheid van een waterkering gedurende de vijfjaarlijkse periode tussen twee toetsingen in. Met inachtneming van de waterkerende functie kan zo beter worden onderbouwd of onderhoud per se moet worden uitgevoerd of juist kan worden uitgesteld tot de volgende veiligheidstoetsing.

Bij de vergelijking van onderhoudsstrategieën hebben we vaak te maken met kosten die op verschillende tijdstippen worden gemaakt. Er zal dan ook 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 zogenoemde contante waarde van deze kosten in het huidige jaar of, met andere woorden, om de toekomstige kosten 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 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 0,5 miljoen gulden in het huidige jaar (zie Figuur 6).

De contante waarde van de verwachte onderhouds- en faalkosten is van nut bij het reserveren en budgetteren van toekomstig beheer. In wezen representeert de contante waarde het geldbedrag dat nu op de bank zou moeten worden gezet, of zou moeten worden geïnvesteerd, opdat de dijkophogingen in de toekomst naar verwachting volledig 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.

Aangezien de geplande levensduur van waterkeringen veelal behoorlijk groot is (meestal een tijdshorizon van meer dan 100 jaar), kunnen optimale onderhoudsintervallen in de meeste gevallen worden bepaald met betrekking tot een "oneindig" grote tijdshorizon. De discontovoet zorgt er immers voor dat kosten die over 100 jaar worden gemaakt in de kostenvergelijking vrijwel niet meetellen (zie ook Figuur 6). Een bijkomend



Figuur 6: Een bedrag van 1 miljoen gulden gediscoteerd van het jaar van uitgifte naar nu met een discontovoet van 5%.

voordeel van het rekenen over een oneindige tijdshorizon is dat de benodigde rekenmodellen aanzienlijk eenvoudiger zijn dan bij een eindige tijdshorizon.

Het onderhouden van waterkeringen tegen zo laag mogelijke kosten komt in wezen neer op het vinden van een optimale balans tussen preventieve maatregelen enerzijds en correctieve maatregelen anderzijds. In de ontwerpfase zullen de initiële aanlegkosten moeten worden afgewogen tegen de toekomstige onderhoudskosten: hoe zwaarder een waterkering immers wordt gedimensioneerd, des te hoger de aanlegkosten, maar des te minder frequent behoeft onderhoud te worden uitgevoerd en des te lager zijn dan ook de onderhoudskosten. In de gebruiksfase zullen de kosten van inspectie en preventief onderhoud moeten worden afgewogen tegen de kosten van correctief onderhoud en falen: hoe vaker immers preventief onderhoud wordt uitgevoerd, des te hoger de kosten van inspectie en preventief onderhoud, maar des te lager ook de kosten van correctief onderhoud en falen. In de ontwerpfase en gebruiksfase gaat het dus om de bepaling van respectievelijk een kosten-optimale investering en een kosten-optimale preventieve onderhoudsstrategie. Merk op dat het bij verbeteringswerken in wezen ook gaat om een ontwerpprobleem. Het vinden van een optimale balans tussen initiële aanleg- en verbeteringskosten en toekomstige beheer- en onderhoudskosten is overigens kenmerkend voor het vakgebied van de 'life cycle costing'.

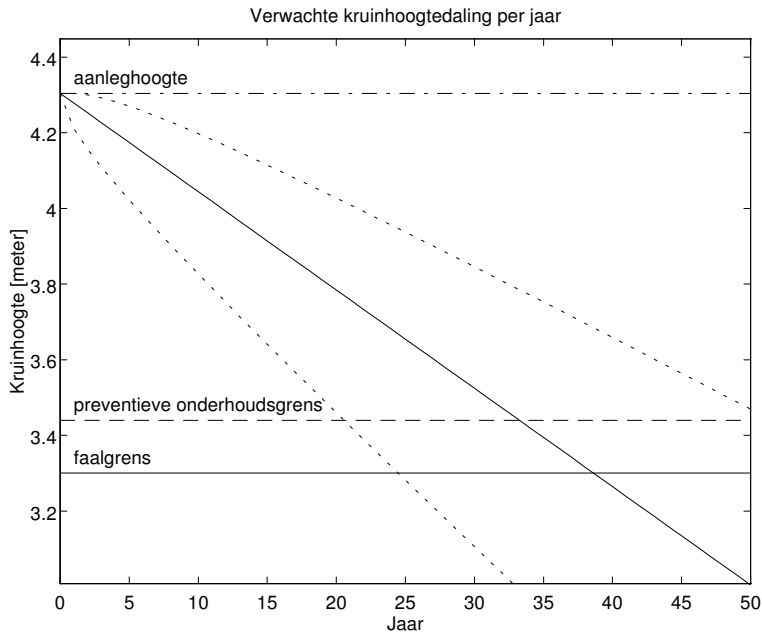
Voorbeelden van onderhoudsoptimalisatie in de ontwerpfase zijn het bepalen van optimale dijkophogingen en zandsuppletiehoeveelheden waarvoor de verwachte kosten minimaal zijn [zie Van Noortwijk (1996a) en Speijker (1994)]. Voorbeelden van onderhoudsoptimalisatie in de gebruiksfase zijn het bepalen van kosten-optimale inspectiefrequenties voor dijken, dynamisch-stabiele golfbrekers en de blokkenmatten en steenbestorting van de Oosterscheldekering [zie Kuijper (1992), Jorissen & De Leeuw van Weenen (1994), Van Noortwijk (1996a) en Vrijling et al. (1992)], alsmede het bepalen van kosten-optimale preventieve onderhoudsintervallen voor civieltechnische kunstwerken, oevers en bodems [zie Van Noortwijk (1996b)].

Voorbeeld: kosten-optimale dijkophoging van de Oostmolendijk

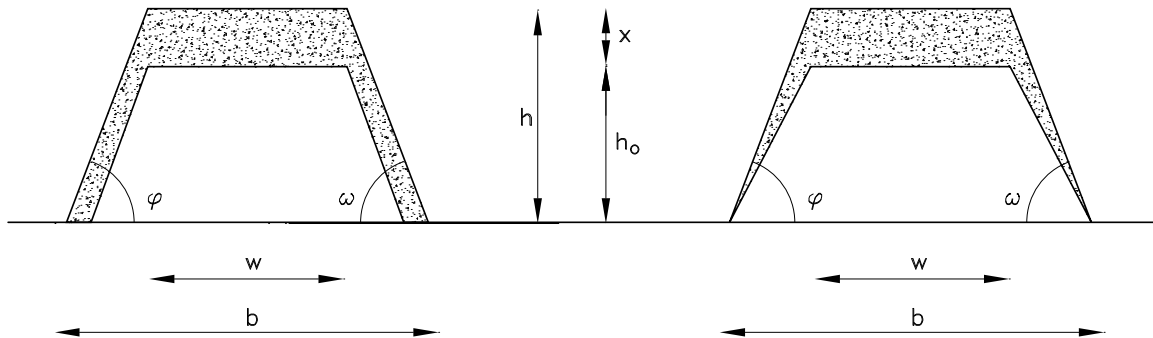
Als voorbeeld van een onderhoudsoptimalisatie zal wederom het ophogen van de Oostmolendijk worden bestudeerd [Speijker (1994) en Van Noortwijk (1996a)]. Herhaal dat voor de komende 50 jaar een kruinhoogtedaling wordt verwacht van ongeveer 1,30 m. De onzekerheid in de kruinhoogtedaling is gemodelleerd als een gamma-proces en is in Figuur 7 weergegeven in de vorm van zogenoemde '90%-betrouwbaarheidsintervallen'. Deze intervallen (de twee stippellijnen) kunnen worden geïnterpreteerd als de boven- en ondergrens waartussen de kruinhoogtedaling zich in 90% van de gevallen zal bevinden. In de figuur is tevens te zien dat de kruinhoogte - zoals gewenst - inderdaad keurig onder de aanleghoogte van in dit geval 4,30 m blijft. Verder zij opgemerkt dat het ook mogelijk is om in plaats van een lineaire veroudering uit te gaan van een niet-lineaire (bij benadering logaritmische) veroudering; zie hiertoe Kuijper (1992), Van Noortwijk (1996a) en Speijker (1994).

Op basis van de huidige veiligheidseisen - in de vorm van de dijktafelhoogte minus de compensatie voor de relatieve zeespiegelstijging - is de faalgrens van de dijk vastgesteld op 3,30 m. Verder is er een veiligheidsmarge van 0,14 m geïntroduceerd om rekening te kunnen houden met een mogelijke overschrijding van de faalgrens gedurende een inspectie-interval van 5 jaar. De veiligheidsmarge representeert in wezen de randvoorwaarde voor een acceptabele faalkans van de dijk tussen twee toetsingen in. Met deze veiligheidsmarge komt de preventieve onderhoudsgrens op een dijkhoogte van 3,44 m.

Bij overschrijding van de preventieve onderhoudsgrens wordt de beheerder voor de vraag gesteld wat de in economische zin optimale dijkophoging is. Zoals reeds eerder betoogd betreft deze beslissing een afweging tussen de investeringskosten van de eerste ophoging en de verwachte kosten van de toekomstige ophogingen. Tevens is het een afweging tussen de vaste kosten en de variabele kosten van het ophogen van een dijk. Ophoging van dijken is een vorm van toestandsafhankelijk preventief onderhoud, waarbij de Wet op de waterkering (1996) een vijfjaarlijkse inspectie voorschrijft.

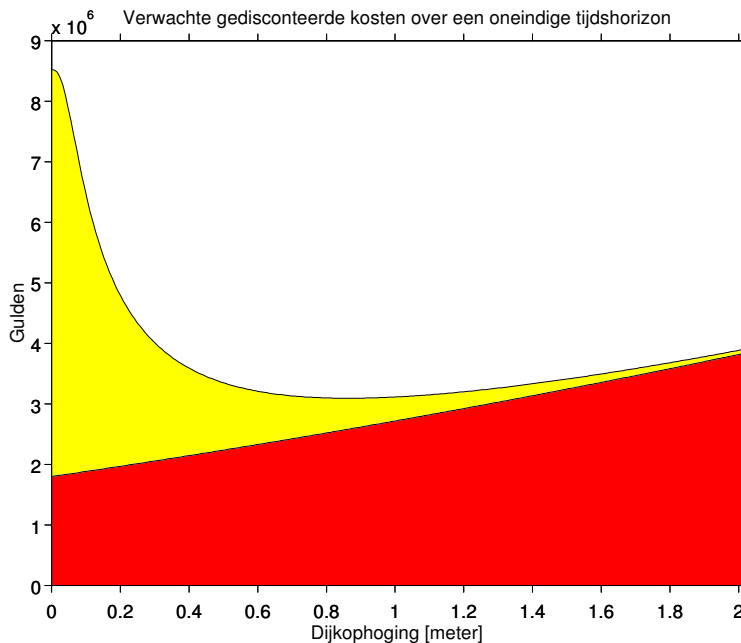


Figuur 7: De verwachte kruinhoogtedaling met bijbehorende onzekerheid in de vorm van 90%-betrouwbaarheidsintervallen.



Figuur 8: De dwarsdoorsnede van een dijk vóór ophoging en na ophoging: de eerste dijkophoging van h_0 meter naar h meter (links) en een navolgende dijkophoging van x meter.

Bij de bestudeerde dijkophoging bestaan de vaste kosten uit de kosten van mobilisatie en wegconstructie (circa 1,8 miljoen gulden), terwijl de variabele kosten een functie zijn van het toegevoegde volume grondspecie (circa 30 gulden per m^3). Een belangrijk verschil tussen de eerste ophoging en de navolgende ophogingen is dat het in het eerste geval óók om een verbredening - en dus om een verbetering - gaat (zie ook Figuur 8). De in de toekomst gemaakte kosten worden gedisconteerd of gekapitaliseerd naar het basisjaar met een discontovoet van 5% per jaar.



Figuur 9: De verwachte gediscoteerde ophogingskosten over een oneindige tijdshorizon uitgesplitst in de kosten van de eerste dijkophoging (zwart gearceerd) en navolgende dijkophogingen (grijs gearceerd).

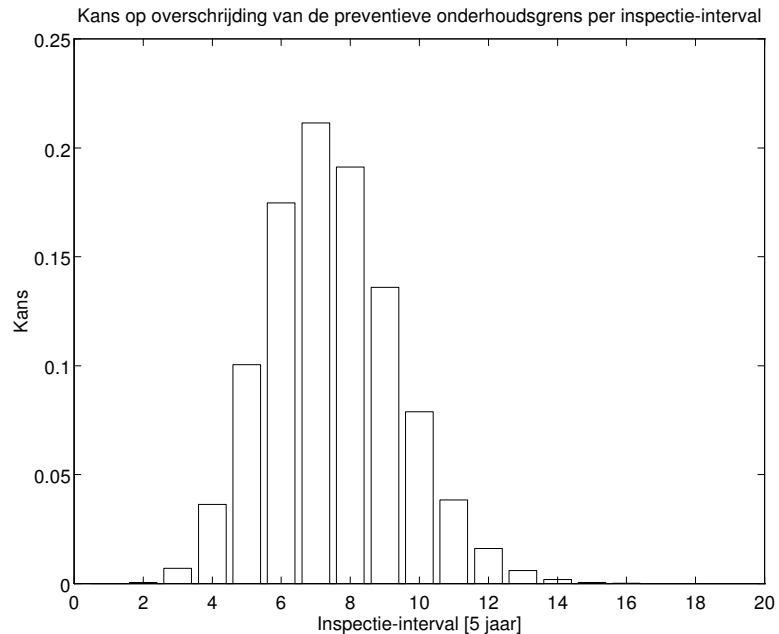
de vijfjaarlijkse vaste kosten zijn de totale kosten zeer hoog: circa 6,5 miljoen gulden. Bij een grote dijkophoging van 2,0 m behoeft het dijkvak slechts eens in de 75 jaar te worden opgehoogd. De bijbehorende investeringskosten zijn echter groot, en wel bijna 4 miljoen gulden. De "gulden middenweg" ligt tussen deze twee kostbare ophogingen in en is een optimale ophoging van 0,86 m, resulterend in een optimale dijkhoogte van 4,30 m en minimale gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon van ongeveer 3 miljoen gulden. Bij deze kosten-optimale beslissing is de verwachte tijd tussen twee dijkophogingen (= de planperiode) ongeveer gelijk aan 40 jaar. Belangrijk is om te constateren dat wanneer de vaste kosten voor een dijkophoging worden gehalveerd, de optimale dijkophoging afneemt tot 0,64 m. In het voorbeeld zou dit model kunnen staan voor een vergelijkbare dijk als de Oostmolendijk, maar dan zonder een geasfalteerd wegdek.

Volgens de huidige ontwerpleidraden met een planperiode van 50 jaar wordt een dijkophoging van 1,30 meter bepaald. Dit is aanzienlijk hoger dan de hier gevonden optimale oplossing. Overigens zijn de uit de leidraad afkomstige planperiode van 50 jaar en de gevonden verwachtingswaarde voor de tijd tussen twee dijkophogingen niet helemaal vergelijkbaar. Bij het optimalisatieproces is rekening gehouden met de onzekerheid in respectievelijk zakking en relatieve zeespiegelstijging. In de leidraden wordt hier niet expliciet rekening mee gehouden, evenmin als met mogelijke verschillen in vaste kosten voor een dijkophoging.

Even belangrijk als de unieke optimale dijkhoogte zijn de dijkophogingen waarvoor de verwachte kosten nagenoeg gelijk zijn aan de minimale verwachte kosten. Zoals duidelijk is te zien in Figuur 9, is de marge rond het economisch optimum vrij groot en heeft de beheerder nog aardig wat keuzemogelijkheden die economisch gezien nagenoeg optimaal zijn. Deze keuzevrijheid kan de beheerder gebruiken om de veiligheidsfunctie af te wegen tegen andere functies als landschap en verkeer (weg op de kruin van de dijk). Zo is ook de subsidie voor aanleg van groot belang voor de beheerders.

Dat het ophogen van dijken tegen minimale kosten inderdaad neerkomt op het vinden van een optimale balans tussen de kosten van de eerste ophoging en de navolgende ophogingen is duidelijk te zien in Figuur 9. Hierin zijn de totale verwachte gediscoteerde kosten over een oneindige tijdshorizon weergegeven als functie van de dijkophoging. Bij een kleine dijkophoging van 0,10 m zal het dijkvak naar verwachting na elke toetsingsronde - dus eens in de vijf jaar - moeten worden opgehoogd. Vanwege

Op basis van de optimale dijkophoging en de onzekere kruinhoogtedaling kan vervolgens worden uitgerekend hoe groot de kans op overschrijding van de preventieve onderhoudsgrens per inspectie-interval is, d.w.z. hoe groot de kans is dat de functionele kwaliteit in een bepaald inspectie-interval beneden de preventieve onderhoudsgrens zakt: zie hiertoe Figuur 10. Merk op dat de kans op preventief onderhoud het grootst is tussen de 35 en 40 jaar. Naast kansen per inspectie-interval kunnen overigens ook kansen per jaar worden uitgerekend.



Figuur 10: De kans op overschrijding van de preventieve onderhoudsgrens per inspectie-interval van 5 jaar.

Het hierboven gepresenteerde onderhoudsmodel heeft onder meer als voordeel dat de onzekerheid in de (gemiddelde) kruinhoogtedaling expliciet kan worden meegenomen bij het plannen van beheer. Verder kan er worden uitgerekend hoeveel geld er moet worden gereserveerd en gebudgetteerd voor de toekomstige dijkophogingen.

Hoe verder?

De optimalisatietechnieken in het bovenstaande voorbeeld zijn niet expliciet opgenomen in de ontwerpleidraden. Wel zijn waar mogelijk resultaten van vergelijkbare optimalisaties in bestaande rekenregels vertaald. De planperiode voor rivierdijken is hiervan een voorbeeld. Als uitgangspunt wordt nu een periode van 50 jaar gehanteerd. Bij relatief grote investeringen (stormvloedkering) wordt een langere planperiode gehanteerd, terwijl bij relatief kleine investeringen (zandsuppleties) juist kortere planperiodes worden gehanteerd. De huidige leidraad 'Toetsen op Veiligheid' is opgesteld zonder gebruik te maken van het in dit artikel gepresenteerde optimalisatiemodel. De minimaal vereiste veiligheid en de vijfjaarlijkse toetsing zijn hiervoor als harde uitgangspunten gehanteerd. Met hetzelfde onderhoudsmodel is het echter mogelijk om naast een kosten-optimale dijkophoging óók een kosten-optimale inspectie-frequentie te bepalen. In de toekomstige leidraden voor ontwerp en toetsing zal naar verwachting meer gebruik worden gemaakt van eenvoudige optimalisatietechnieken. Hiervoor is echter nog onderzoek nodig.

De ontwikkeling van onderhoudsoptimalisatie-technieken voor waterkeringen heeft zich tot nu toe voornamelijk gericht op de aanpassing van modellen uit de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek voor toepassing in de waterbouwkunde. De nu beschikbare modellen gaan veelal uit van het onderhoud aan één onderdeel of één dijkringvak en er wordt meestal alleen naar één faalmechanisme en één functie gekeken. Mogelijke nieuwe ontwikkelingen zijn dan ook het bestuderen van meer dan één onderdeel of dijkringvak, meer dan één faalmechanisme en meer dan één functie. Hierbij spelen eventuele statistische afhankelijkheden uiteraard een grote rol. Wat betreft de verbetering en beheer van dijken is verder de samenhang tussen de optimale ontwerphoogte (de faalgrens als afweging tussen investeringskosten en overstromingsschade) en de

optimale dijkophoging (de ophoging als afweging tussen investeringskosten en toekomstige onderhoudskosten) van belang.

Modellerings technieken op het gebied van multi-functioneel onderhoud aan meer dan één dijkkringvak passen prima binnen de wijzigende veiligheidsbenadering van faalkansen per dijkkringvak naar overstromingskansen per dijkkringgebied. In combinatie met de vijfjaarlijkse veiligheidstoetsing kunnen onderhoudsmodellen de beheerder van dienst zijn bij het schatten van faal- en overstromingskansen. Er kan zo een beter inzicht worden verkregen in hoe de veiligheid van dijkingen in de loop der tijd verandert. Aanleg en beheer van waterkeringen kunnen dan ruim van te voren en zo optimaal mogelijk worden gepland en gebudgetteerd.

Conclusies

Een (verdere) verschuiving van de inspanning van aanleg en verbetering naar onderhoud van de waterkering is onvermijdelijk. Hoewel de waterkeringszorg in Nederland nooit af is, zal met de uitvoering van de huidige versterkingsronde de wettelijk vereiste veiligheid worden gerealiseerd. Handhaving van deze veiligheid staat voorop. In de Wet op de waterkering wordt hiertoe een vijfjaarlijkse toetsing van de aanwezige veiligheid voorgeschreven. Ten behoeve van de toetsing heeft de TAW een specifieke Leidraad Toetsen op Veiligheid opgesteld, waarin de rekenregels voor de toetsing zijn opgenomen. Bij een onvoldoende score wordt de waterkeringbeheerder geacht verbeteringsmaatregelen te treffen. Hierbij worden de vigerende ontwerpleidraden gebruikt. Door een pragmatische opzet van de toetsing en een goede afstemming tussen de verschillende leidraden wordt een goede start van dit toetsproces en de handhaving van de veiligheid nagestreefd.

Voor het budgetteren en minimaliseren van de toekomstige beheer- en onderhoudskosten is - zoals in dit artikel besproken - inmiddels een aantal onderhoudsoptimalisatie-modellen ontwikkeld. Gegeven de vijfjaarlijkse veiligheidstoetsing kunnen zowel de kans op het onvoldoende vervullen van functies als de toekomstige kosten van beheer worden geschat. Kostenafwegingen kunnen worden gemaakt tussen initiële aanlegkosten en toekomstige onderhoudskosten, tussen vaste kosten en variabele kosten en tussen preventieve onderhoudskosten (vóór falen) en correctieve onderhoudskosten (ná falen). Optimale onderhoudsbeslissingen kunnen worden genomen, terwijl expliciet rekening wordt gehouden met de onzekerheid in de mate van veroudering en het moment van falen.

Ook dijkophoging kan met behulp van ontwikkelde modellen worden geoptimaliseerd. Voor een voorbeeld leidt deze optimalisatie tot een geringere ophoging van de dijk dan volgens de ontwerpleidraad, waarbij de verwachte planperiode slechts in geringe mate afwijkt van het huidige uitgangspunt van 50 jaar. Bij dit voorbeeld zijn in verband met een wegdek op de dijk aanzienlijke vaste kosten voor dijkverhoging in rekening gebracht. Indien deze kosten verminderd worden, neemt de optimale dijkophoging nog verder af.

De toepassing van optimalisatietechnieken is vooralsnog beperkt tot relatief eenvoudige voorbeelden: één functie, één faalmechanisme en één herstelmaatregel. Veel onderzoek zal echter nog moeten worden gedaan naar de wijze waarop onderhoudsoptimalisatie-technieken kunnen worden verwerkt in eenvoudige rekenregels voor toekomstige toetsingsleidraden. Gezien de hoge beheer- en onderhoudskosten kan optimalisatie desalniettemin een aanzienlijke kostenbesparing opleveren. Opdat het onderhoudsoptimalisatie-onderzoek in de pas loopt met de overgang van de overbelastingsbenadering per dijkvak naar de overstromingsbenadering per dijkkringgebied, zal er in de toekomst meer aandacht moeten worden besteed aan onderhoud van meer dan één onderdeel of dijkkringvak, met inachtneming van meer dan één faalmechanisme en meer dan één functie.

Tevens zal er bij de ontwikkeling van geautomatiseerde informatiesystemen ten behoeve van waterkeringenbeheer rekening moeten worden gehouden met welke kosten- en verouderingsgegevens van belang zijn voor een onderhoudsoptimalisatie. Dit zijn b.v. niet alleen gegevens over het verouderen en falen van waterkeringen in het verleden, maar óók betrouwbare schattingen hierover voor de toekomst.

Literatuur

D. van Dantzig (1956). Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica*, nr. 24, blz. 276-287.

Deltacommissie (1960). Rapport Deltacommissie, 's-Gravenhage.

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (1996). *Kustbalans 1995: De Tweede Kustnota*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

F.B.J. Gijbers (1987). Optimalisatie van onderhoud. Technisch Rapport B-86-549, IBBC-TNO, Delft.

R.E. Jorissen & R.P. de Leeuw van Weenen (1994). Maintenance of hydraulic structures: example storm surge barrier Eastern Scheldt. International Commission on Large Dams ICOLD Congress '94, Durban, South Africa.

H.K.T. Kuijper (1992). Onderhoud in de waterbouw. Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft.

J.M. van Noortwijk (1996a). Optimal Maintenance Decisions for Hydraulic Structures under Isotropic Deterioration. Proefschrift Technische Universiteit Delft.

J.M. van Noortwijk (1996b). De bepaling van interventieniveaus; een onderhoudsmodel op basis van de onzekerheid in het conditieverloop en de Netto-Contante Waarde van de kosten. HKV LIJN IN WATER & Bouwdienst Rijkswaterstaat, ProjectBureau Onderhoud Kunstwerken (PBOK), Utrecht.

Rijkswaterstaat Bouwdienst & Dienst Weg- en Waterbouwkunde (1997). *Beheer op Peil (BOP 1996): BeheersPlannen Nat (BPN), Tweede Generatie, Landelijke rapportage*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Utrecht & Delft.

L.J.P. Speijker (1994). Optimaal onderhoud van dijken, Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft.

Technische Adviescommissie Waterkeringen (1996). *Leidraad Toetsen op Veiligheid*.

Tweede Kamer der Staten-Generaal (1996). *Wet van 21 december 1995, houdende algemene regels ter verzekering van de beveiliging door waterkeringen tegen overstromingen door het buitenwater en regeling van enkele daarmee verband houdende aangelegenheden (Wet op de waterkering)*. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, Nummer 8, Sdu Uitgevers, Den Haag.

Z.C. Vonk & M.P.A.M. van de Looij (1996). Ontwikkeling GIS voor waterkeringen- en waterkwantiteitsbeheer. *Het Waterschap*, Nummer 5, blz. 157-163.

J.K. Vrijling, H.K.T. Kuijper, R.E. Jorissen & H.E. Klatter (1992). The maintenance of hydraulic structures. International Conference on Coastal Engineering ICCE'92, Venice, Italy.