

Omgaan met onzekerheden in het waterveiligheidsbeleid

Robin Nicolai, Ton Vrouwenvelder, Karolina Wojciechowska & Henri Steenbergen

Nederland is wereldwijd vermaard om haar expertise op het gebied van waterbouw. De strijd tegen het water wordt al gevoerd sinds het begin van de jaartelling. Zeeuwen waren de eersten die hun vruchtbare land tegen stormvloeden beschermden door ringdijken te bouwen om polders (Rooijendijk, 2009). De dijken bleken lang niet altijd bestand tegen stormvloeden. Diepe geulen doorsneden de dijken, maar de kennis ontbrak om die te dichten. Alleen de cisterciënzer monniken konden dat. Maar na het herstellen van de dijken waren er nieuwe grotere stormvloeden, die nieuwe betere maatregelen vereisten. Langzamerhand werd er steeds meer kennis verworven over het bouwen van waterkeringen. Het sluitstuk tot nu toe vormen de Deltawerken, die in 1986 werden voltooid met de oplevering van de Oosterscheldekering.

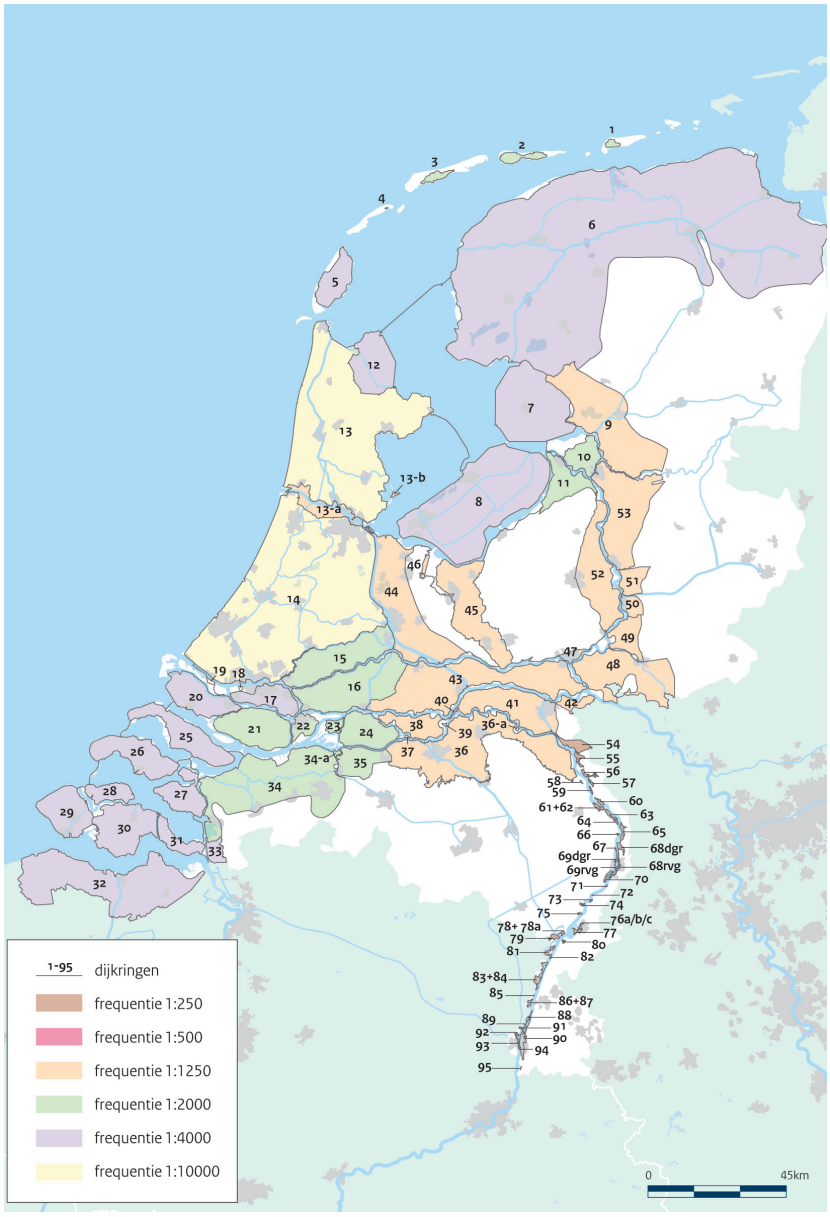
De huidige waterveiligheidsfilosofie is mede te danken aan de ideeën van wiskundige David van Dantzig. De operationele research (OR) technieken in zijn artikel *Economic decision problems for flood prevention* vormden de wetenschappelijke onderbouwing voor de veiligheidsnormen van de Deltacommissie uit 1960. De Deltacommissie was direct na de watersnoodramp van 1953 inge-

steld om te onderzoeken hoe de getroffen gebieden voortaan beter te beschermen. De destijds opgestelde veiligheidsnormen vormen nu nog de basis voor de wettelijke veiligheidstoetsing van de waterkeringen. Dit artikel laat aan de hand van een vorig jaar uitgevoerde studie zien hoe OR en statistiek binnen de wettelijke toetsing worden toegepast.

Waterveiligheid in Nederland

Een groot deel van Nederland wordt bedreigd door overstromingen vanuit de Rijn en de Maas, vanuit het IJsselmeer of vanuit de Noordzee. Om Nederland te beschermen tegen zulke overstromingen is het opgedeeld in dijkringgebieden: gebieden omringd door een reeks van aaneengesloten primaire waterkeringen (dijken, duinen of kunstwerken) en hoge gronden. Iedere dijkring heeft een wettelijk vastgesteld veiligheidsniveau. Deze fungeert als norm en is uitgedrukt in een overschrijdingsfrequentie (zie figuur 1). De totale lengte van de primaire waterkeringen is ongeveer 3.600 kilometer.

De Waterwet vereist dat de waterkeringen bestand zijn tegen omstandigheden, i.e. waterstanden en golven, waarvan de overschrijdingsfrequentie groter is dan de norm. De hoogte van de norm hangt af van de (economische) waarde van het gebied en de herkomst van de overstroming (kust, meer of rivier). Voor de kustregio's is het veiligheidsniveau meestal gelijk aan 1/4000 en 1/10000 per jaar gekozen. Voor de dijkringen



Figuur 1. Veiligheidsnormen van dijkringgebieden in Nederland

langs de rivieren Rijn en Maas is de norm 1/1250 of 1/2000 per jaar. De norm van enkele kleine dijkringen langs de Maas in Limburg – de Maaskaden – is gelijk aan 1/250 per jaar. Voor iedere dijkring worden waterstanden en golven bepaald met een overschrijdingsfrequentie die overeenkomt met de norm. Deze *maatgevende* waterstanden en golven worden Hydraulische Randvoorwaarden (HR) genoemd.

De HR spelen een belangrijke rol in de wettelijke toetsing van de primaire waterkeringen. Bij de toetsing wordt voor verschillende faalmechanismen nagegaan of de waterkering bestand is tegen de *maatgevende omstandigheden*. De huidige veiligheidsfilosofie voorziet *nog niet* in een volledig probabilistische betrouwbaarheidsanalyse van de waterkering, die als uitkomst een overstromingskans kent. De belasting op de waterkering is gemodelleerd als de verwachtingswaarde van een stochast. De sterkte van de waterkering is een constante. Als compensatie voor onzekerheden zijn aan de sterktekant wel veiligheidsmarges ingebouwd.

Traditioneel wordt er bij de berekening van de HR alleen rekening gehouden met onzekerheden als gevolg van natuurlijke variabiliteit zoals zeewaterstand, meerpeil, afvoer en wind. Onzekerheden in andere invoerparameters, statistische gegevens en fysische modellen – samen kennisonzekerheden – worden verdisconteerd in een verwachtingswaarde of aanname. Ze maken (nog) geen deel uit van het modelinstrumentarium voor het afleiden van de HR. *Uitsluitend,* maar niet alle, natuurlijke onzekerheidsbronnen worden volledig probabilistisch meegenomen ('uitgeïntegreerd') om tot de verwachtingswaarde (lees HR) te komen.

De belangrijkste argumenten om uit te gaan van verwachtingswaarden in plaats van het volledig meenemen ('uitintegreren') van alle (kennis) onzekerheden, zijn:

- Meenemen van kennisonzekerheden in de afleiding van de HR zou een aanpassing betekenen van de manier waarop waterkeringen worden getoetst. Mogelijk kan dit worden opgevangen door aanwezig conservatisme aan de sterktekant, maar dit is niet zeker.
- De complexiteit van de modellen neemt toe naarmate meer onzekerheden worden meegenomen.
- De benodigde hoeveelheid invoergegevens en modelleerwerk neemt enorm toe. Een belangrijke vraag hierbij is of er genoeg informatie is om deze onzekerheden 'voldoende betrouwbaar' te kunnen modelleren.

Bij beleidsmakers bestaat behoefte aan inzicht in het effect van kennisonzekerheden op de HR. Enerzijds wil men weten wat een volledige probabilistische faalkansanalyse oplevert. Anderzijds is het voor het prioriteren van onderzoek naar kennishiaten belangrijk om te weten welke kennisonzekerheden de HR het meest beïnvloeden. In 2010 is door de auteurs een onderzoek uitgevoerd naar het effect van kennisonzekerheden op de HR. Het doel was om de grootte van het effect te bepalen en aan te geven welke onzekerheidsbronnen de grootste invloed hebben op de HR. Dit artikel is een beknopte samenvatting van deze studie.

Modellering hydraulische belastingen

Dreigend hoogwater en extreme golfcondities worden veroorzaakt door hoge afvoeren, hoge windsnelheden, hoge zeewaterstanden of hoge meerpeilen of combinaties hiervan. Het modelinstrumentarium heeft als invoer een aantal natuurlijke kansvariabelen: wind, zeewaterstand, meerpeil en afvoer. Deze basisstochasten hebben een bepaalde kansverdeling, die meestal op een beperkte set meetgegevens (bijvoorbeeld jaarmaxima van rivierafvoer of zeewaterstand) is gebaseerd. De onzekerheid in de parameters van de kansverdeling kan door korte meetreeksen best groot zijn. Na ongeveer 120 jaar meten is

de hoogst waargenomen afvoer op de Rijn bij Lobith bijvoorbeeld 12.600 m^3/s. Om de dijken langs de Rijn te toetsen is echter de afvoer met een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar nodig. Uit een statistische analyse van extreme Rijnafvoeren volgt uiteindelijk een *maatgevende* Rijnafvoer van 16.000 m^3/s. Het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval loopt naar schatting van 13.500 tot 18.500 m^3/s. Het modelinstrumentarium houdt, conform het uitgangspunt van de huidige aanpak voor de HR, geen rekening met deze statistische onzekerheid.

Fysische modelberekeningen leiden voor verschillende combinaties van de basisstochasten tot de lokale waterstand en de golfcondities op de waterkering. Deze berekeningen worden apart gemaakt en de uitkomsten worden opgeslagen in een database. De fysische modellen voor de waterbeweging en golfgroei zijn net als ieder model een benadering van de werkelijkheid. De uitkomsten bevatten een bepaalde onzekerheid. Hierbij komt nog dat de invoerparameters van de fysische modellen, zoals bijvoorbeeld de bodemligging, als deterministische parameters worden verondersteld. In werkelijkheid vertoont de bodemligging een natuurlijke variatie in ruimte en in tijd, die binnen het huidige beleid niet volledig is meegenomen.

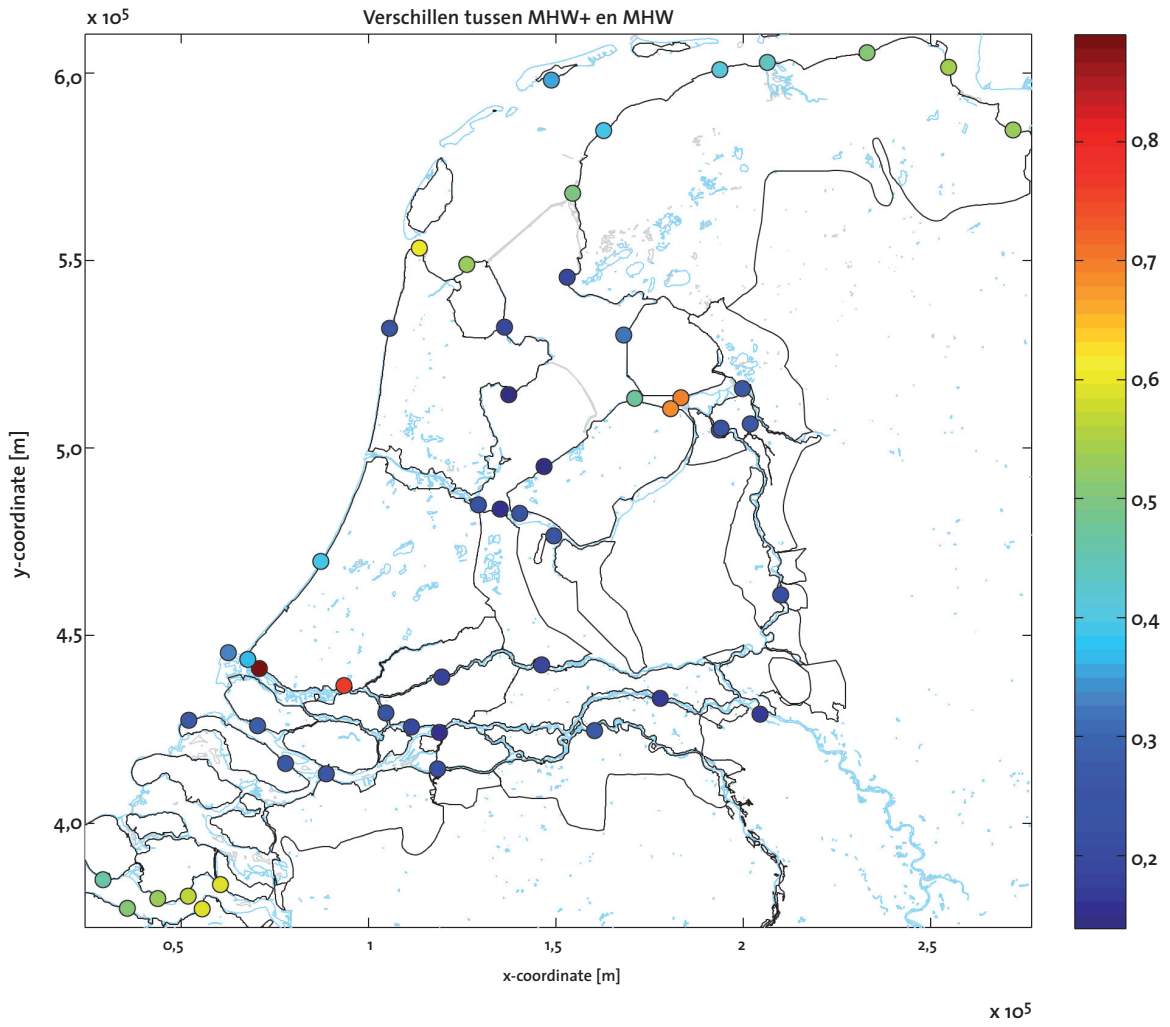
De probabilistische berekening van de HR combineert de vooraf berekende fysische grootheden met de kansverdelingen van de basisstochasten. De HR volgen uit de *meest waarschijnlijke* waarden of verdelingen van de basisstochasten met een gezamenlijke overschrijdingsfrequentie gelijk aan de norm. In de vooraf opgestelde database worden de lokale waterstand en golfcondities opgezocht die optreden bij deze waarden van de basisstochasten. De waarden van de basisstochasten en de HR vormen samen het *ontwerppunt* in deze betrouwbaarheidsanalyse.

Modellering kennisonzekerheden

In de in 2010 uitgevoerde studie is eerst een lijst opgesteld met onzekerheden, die niet in het

	WATERSYSTEEM				
ONZEKERHEIDSBRON	BOVENRIVIEREN	BENEDENRIVIEREN	KUST	MEREN	VECHT- EN IJSSELDELTA
Modelonzekerheid lokale waterstand	X	X		X	X
Statistische onzekerheid in rivierafvoer	X	X			X
Statistische onzekerheid in windsnelheid	X	X	X	X	X
Statistische onzekerheid in IJsselmeerpeil				X	X
Statistische onzekerheid in zeewaterstand		X	X		
Bodemligging	X	X	X	X	X
Strijklengte	X	X			X
Fout in golfparameters	X	X	X	X	X

Tabel 1. Kennisonzekerheden voor verschillende watersystemen



Figuur 2. Effect van additionele onzekerheden op maatgevende waterstanden

modelinstrumentarium zijn opgenomen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen onzekerheden voortkomend uit de fysische modellering, statistische onzekerheden (vanwege beperkte hoeveelheid gegevens) en overige invoerparameters (zoals bijvoorbeeld de bodemligging). Voor iedere onzekerheidsbron is op basis van bestaande literatuur of *expert judgement* een kansverdeling geschat. In de meeste gevallen zijn gemiddelde en standaarddeviatie ingeschat en is een normale kansverdeling verondersteld. De statistische onzekerheid in de *maatgevende* Rijnafvoer is bijvoorbeeld als een normale kansvariabele met gemiddelde 16.000 m^3/s en standaarddeviatie 1.276 m^3/s (anders gezegd: een variatiecoëfficiënt van 8%) gemodelleerd. Niet alleen de onzekerheid rondom de maatgevende Rijnafvoer, maar de onzekerheid rondom alle mogelijke afvoeren moet worden meegenomen. Standaard gaat het model uit van een gegeven relatie tussen de Rijnafvoer en de overschrijdingsfrequentie van bepaalde afvoerwaarden: de 'werklijn'. De statistische onzekerheid in de Rijnafvoer is daarom nu gemodelleerd door een kansvariabele met gemid-

delde 1 en variatiecoëfficiënt 8% te vermenigvuldigen met de afvoer op deze werklijn.

Tabel 1 toont de kennisonzekerheden die aan het model zijn toegevoegd voor de berekening van hoogwaterstanden en golfcondities. Deze onzekerheidsbronnen zijn volledig probabilistisch verwerkt in de berekening van de waterstanden en golfcondities.

Resultaten en conclusies

De uitkomsten van de berekeningen met de additionele stochasten voor ongeveer 50 waterkeringen in Nederland laten zien dat de waterstanden en golfcondities hoger/zwaarder uitpakken dan het referentieniveau (huidige methode). Dit is niet verrassend. Toevoegen van extra onzekere factoren leidt bijna altijd tot hogere verwachtingswaarden, omdat de hogere stochastwaarden zwaarder doorwegen in het eindresultaat. Figuur 2 toont het effect op de waterstand. Het effect van kennisonzekerheden op de waterstand is over het algemeen beperkt tot enkele decimeters, maar dit is wel significant.

Opvallend is dat het toevoegen van kennisonzekerheden resulteert in een 0,8 m hogere waterstand bij Rotterdam. Hier is nog nader onderzoek gewenst, maar het lijkt erop dat een eenvoudige wijziging van het sluitregime van de Maeslantkering dit effect al kan beperken.

Met name de zeewaterstand- en afvoerstatistiek en de onzekerheid in de lokale waterstand blijken zwaar door te wegen in de berekende waterstanden. De onzekerheid rondom de genoemde factoren is erg groot en dit werkt vrijwel rechtstreeks door in de maatgevende waterstand. Golfcondities worden veelal beïnvloed door de grote statistische onzekerheid in de windsnelheid.

De studie die is uitgevoerd is niet uitputtend of volledig. Niet alle kennisonzekerheden zijn toegevoegd. De resultaten geven echter wel inzicht in de belangrijkste kennisonzekerheden voor de HR. Statistische onzekerheidsbronnen hebben het grootste effect op de HR. Het is wel zo dat het bepalen van statistische onzekerheid niet eenduidig gebeurt. Het verdient aanbeveling om hier objectieve methoden voor te ontwikkelen. Indien wordt gekozen om overstromingskansen en risico's volledig probabilistisch te bepalen, moeten kennisonzekerheden worden meegenomen. Een tweede aanbeveling is het uitvoeren van een modelanalyse waarbij alle onzekerheden en verborgen veiligheid, ook aan de sterktekant, integraal worden meegenomen. Het volledige model moet de basis vormen voor het uitvoeren van de economische kosten-baten optimalisatie, zoals in 1956 door Van Dantzig uitgevoerd.

Literatuur

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

Rooijendijk, C. (2009). *Waterwolven. Een geschiedenis van stormvloeden, dijkenbouwers en droogmakers.* Amsterdam/Antwerpen: Uitgeverij Atlas.

Robin Nicolai is werkzaam als adviseur bij HKV lijn in water. Hij is in 2008 gepromoveerd op een onderzoek naar onderhoudsoptimalisatie van complexe systemen. Momenteel richt hij zijn aandacht op onzekerheden in waterveiligheid.
E-mail: <r.p.nicolai@hkv.nl>.

Karolina Wojciechowska werkt als adviseur / onderzoeker bij HKV lijn in water. Zij schrijft een proefschrift over de toepassing van beslismodellen in operationeel overstromingsmanagement.
E-mail: <wojciechowska@hkv.nl>.

Ton Vrouwenvelder en Henri Steenbergen zijn beiden werkzaam als senior onderzoeker constructieve veiligheid bij TNO. Zij houden zich onder meer bezig met het beoordelen van zowel nieuwe als bestaande bouwconstructies alsmede het ontwikkelen en toepassen van geavanceerde rekentechnieken voor het ontwerpen en toetsen van waterkeringen.
E-mailadressen: <ton.vrouwenvelder@tno.nl> & <henri.steenbergen@tno.nl>.