

**Nauwkeurighedsanalyse 'Ruimte voor
Rijntakken'
Onzekerheden in waterstanden en kosten
onderzocht**

gepubliceerd in:

Land + Water

jaargang 40, nummer 9, pag. 59-61, 2000

Auteurs: M.T. Duits
H. Havinga
J.M. van Noordwijk

ISBN 90-77051-06-6

Nauwkeurigheidsanalyse 'Ruimte voor Rijntakken'

Onzekerheden in waterstanden en kosten onderzocht

M.T. Duits¹, H. Havinga² en J.M. van Noortwijk³

In een recent advies aan het ministerie van Verkeer en Waterstaat zijn voorstellen gedaan voor rivierverruiming, waarmee eventuele toekomstige hogere rivierafvoeren zonder dijkverhoging kunnen worden opgevangen. Daarbij is ook onderzocht wat de nauwkeurigheid is van de uitkomsten van de toegepaste waterbewegings- en kostenmodellen.

Inleiding

Het project 'Ruimte voor Rijntakken' (RVR) heeft begin dit jaar geresulteerd in een advies aan het ministerie van Verkeer en Waterstaat over de vraag hoe een eventuele toekomstige toename van de maatgevende afvoer het hoofd moet worden geboden. Conform de Vierde Nota Waterhuishouding zijn hierbij vooral rivierverruimende maatregelen als uitgangspunt gehanteerd. Hiervoor komt een aantal maatregelen in aanmerking, zoals verwijdering van hydraulische knelpunten en zomerkaden, aanleg van retentiebekkens en uiterwaardverlaging en -verbreding. Voor een aantal situaties is een combinatie gezocht met natuurontwikkeling in de uiterwaarden, waardoor in deze uiterwaarden de hydraulische ruwheid kan toenemen. Het project RVR had als doel de keuzen uit een aantal inrichtingsalternatieven (combinaties van maatregelen) voor te bereiden. Beoordeling van deze - alternatieven op basis van onzekerheden in waterstanden en kosten levert hierbij een verdieping van het inzicht.

In de Wet op de Waterkering is de gewenste veiligheid tegen overstromen van dijken langs de rivieren Rijn en Maas vastgesteld. De overschrijdingsfrequentie van de gehanteerde maatgevende afvoer in de boven- en middenloop van deze rivieren is gemiddeld eens in de 1250 jaar. Momenteel bedraagt de maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith 15.000 m³/s. Deze afvoer bepaalt op zijn beurt de maatgevende hoogwaterstanden (MHW-standen). Op basis van deze waterstanden - gecombineerd met opwaaiing, golfloop en waakhoogte - worden de dijken langs de rivieren gedimensioneerd. In

¹ Ir. M.T. Duits is adviseur risico-analyse en veiligheid bij HKV LIJN IN WATER te Lelystad.

² Ir. H. Havinga is werkzaam bij Rijkswaterstaat, directie Oost-Nederland, afdeling rivierkunde in Arnhem en is docent aan de TU-Delft, vakgroep Waterbouwkunde.

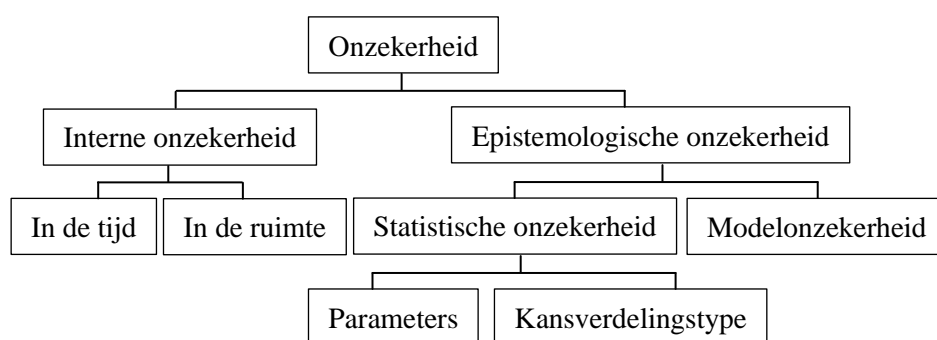
³ Dr.ir. J.M. van Noortwijk is senior adviseur risico-analyse en veiligheid bij HKV LIJN IN WATER te Lelystad.

het RVR-project is gezocht naar mogelijkheden om een nieuwe maatgevende afvoer van 16.000 m³/s op te vangen zonder een nieuwe ronde van dijkversterking.

Het doel van de RVR-nauwkeurigheidsanalyse (1999) was het kwantificeren van onzekerheden in de maatgevende hoogwaterstanden en de kosten van inrichtingsalternatieven op basis van onzekerheden in modelparameters. Door het toepassen van probabilistische technieken worden onzekerheden in de diverse modelparameters 'doorgegeven' aan de berekende waterstanden en kosten, die dan vervolgens ook met een zekere nauwkeurigheid bekend zijn. Bij de transformatie van invoer naar uitvoer wordt gebruikgemaakt van de waterbewegingsmodellen SOBEK (één-dimensionaal) of WAQUA (twee-dimensionaal). Binnen RVR is voor de vergelijking van inrichtingsalternatieven gebruikgemaakt van SOBEK, terwijl wettelijk vastgestelde maatgevende waterstanden met WAQUA worden bepaald.

Typen onzekerheid

Ten behoeve van het uitvoeren van een nauwkeurigheidsanalyse zijn er ruwweg twee typen onzekerheid te onderscheiden: inherente onzekerheid en epistemologische onzekerheid. Inherente onzekerheid representeert stochasticiteit of variabiliteit van de natuur in de tijd (bijvoorbeeld onvoorspelbaarheid van de afvoer) of in de ruimte (bijvoorbeeld fluctuatie van bodemhoogte en hydraulische ruwheid in lengterichting van de rivier). Het is niet mogelijk om inherente onzekerheid volledig te reduceren. Wel kan inherente onzekerheid in de vorm van kansverdelingen worden gemodelleerd, zodat hiermee rekening kan worden gehouden. Epistemologische onzekerheid representeert het gebrek aan kennis over een fysisch systeem. De twee belangrijkste typen van epistemologische onzekerheid zijn statistische onzekerheid (ten gevolge van onvoldoende waarnemingen) en modelonzekerheid (ten gevolge van onvoldoende kennis). Epistemologische onzekerheden kunnen worden gereduceerd door toename van kennis en het doen van meer waarnemingen.



Figuur 1: Typen onzekerheid.

Inherente onzekerheid in de tijd - zoals de maatgevende afvoer - en de bijbehorende statistische onzekerheden waren in de nauwkeurigheidsanalyse geen onderwerp van studie. Deze onzekerheden zijn reeds in het project 'Integrale Verkenning Rijntakken' (1996) bepaald. De onzekerheden die wel zijn onderzocht, zijn inherente onzekerheden in de ruimte (van ruwheid, geometrie en verhang) en modelonzekerheden (afvoer na de splitsingspunten en benedenstroomse randvoorwaarden). Voor het

schatten van deze onzekerheden is gebruikgemaakt van de literatuur enerzijds en beschikbare gegevens en experts anderzijds.

Uitgangspunten

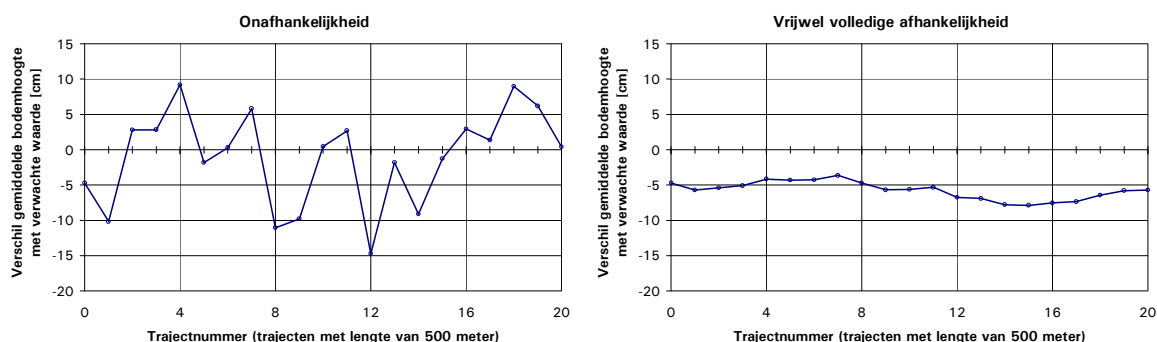
Een gevoeligheidsanalyse is een studie naar de invloed van een modelparameter op het eindresultaat zonder rekening te houden met de kans van optreden van de parameterwaarden. Bij een onzekerheids- of nauwkeurigheidsanalyse wordt de kans van optreden van verschillende parameterwaarden daarentegen wel meegenomen.

In de onderhavige nauwkeurigheidsanalyse zijn de waterstanden berekend met SOBEK en WAQUA. Met SOBEK zijn de MHW-standen berekend voor het Rijntakkenmodel met instroomrand bij Lobith en benedenranden bij Vuren (Waal), Hagestein (Nederrijn/Lek) en het Ketelmeer (IJssel). Met WAQUA zijn de MHW-standen berekend voor een IJsselmodel met Zutphen als instroomrand en een locatie iets benedenstrooms van Katerveer (nabij Zwolle) als benedenrand. De maatgevende afvoer van de Bovenrijn bij Lobith is verondersteld exact gelijk te zijn aan 16.000 m³/s.

Bij het berekenen van de maatgevende hoogwaterstanden zijn de volgende zeven modelparameters als onzekerheidsbronnen onderscheiden: de hydraulische ruwheid en bodemhoogte van zomerbed en uiterwaarden (voor trajecten met lengte 500 m), de waterstand bij de benedenranden, het bodemverhang en de verdeling van de Bovenrijnafvoer over de benedenstroomse Rijntakken bij de splitsingspunten. De laatste twee onzekerheden zijn volledig bepaald door de eerste vijf.

In tegenstelling tot het SOBEK-model bevat de afvoerinstroom bij het gekozen WAQUA-model wel onzekerheden. Deze onzekerheden worden veroorzaakt door de onzekere afvoerverdeling bij de splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop. Voor het WAQUA-model van de IJssel is de onzekerheid in de afvoerinstroom gelijk genomen aan die berekend met SOBEK.

Alle onzekerheden zijn gerepresenteerd met behulp van kansverdelingen (zoals de symmetrische - klokvormige - normale verdeling of de asymmetrische lognormale verdeling). In een bepaald riviertraject kan de bodemhoogte zich bijvoorbeeld met een kans van ongeveer 90% bevinden tussen 5,9 en 6,1 m +NAP. Het 90%-nauwkeurigheidsinterval is dan $\pm 0,1$ m.



Figuur 2: Fluctuatie van de gemiddelde bodemhoogte van uiterwaarden met een trajectlengte van 500 meter voor onafhankelijkheid (links) en vrijwel volledige afhankelijkheid (rechts) tussen de trajecten onderling.

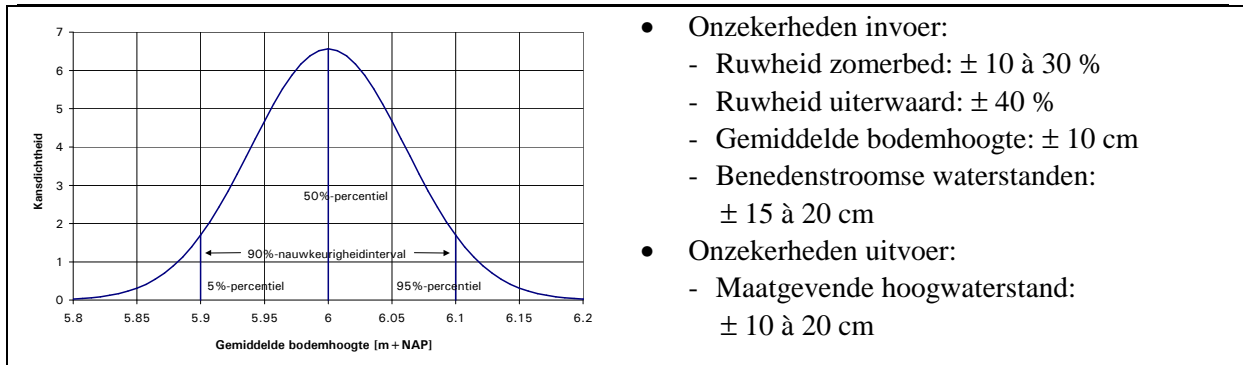
In de nauwkeurighedsanalyse zijn verder drie soorten statistische afhankelijkheden onderscheiden: correlaties tussen verschillende onzekere modelparameters (zoals tussen ruwheid van gras en bos), correlaties tussen oppervlakteaandelen die sommen tot 100% (zoals de verdeling van ecotopen in gras, bos, overige natuur, water en bebouwing) en correlaties in lengterichting (zoals bodemhoogte en ruwheid). Is de correlatie van bijvoorbeeld de bodemhoogte in lengterichting klein, dan is er sprake van een grote fluctuatie. Is deze correlatie daarentegen groot, dan fluctueert de hoogte nauwelijks.

Monte-Carlo-simulatie

De nauwkeurighedsbanden van de maatgevende hoogwaterstanden zijn met behulp van Monte-Carlo-simulatie bepaald. In zo'n simulatie wordt voor elke modelparameter uit de vooraf gespecificeerde kansverdeling een random-waarde getrokken, waarbij rekening gehouden wordt met afhankelijkheden. Voor elke verzameling getrokken waarden van de parameters worden met de waterbewegingsmodellen de maatgevende hoogwaterstanden voor verschillende locaties berekend. Door herhaling van de Monte-Carlo-trekkingen worden zo verschillende waterstanden gegenereerd.

Op basis van de simulatie kunnen vervolgens zowel verwachte waarden als nauwkeurighedsbanden van de MHW-standen bepaald worden. Voor het SOBEK-Rijntakkenmodel variëren de 90%-nauwkeurighedsbanden van ± 10 cm bij Lobith tot ± 20 cm bij de benedenrand van de IJssel, het Ketelmeer. Uit de analyse blijkt dat de nauwkeurigheden van de met SOBEK en WAQUA berekende maatgevende hoogwaterstanden nagenoeg aan elkaar gelijk zijn. Dit is een gevolg van het feit dat de onzekerheden in de modelparameters overeenkomstig zijn. De resulterende onzekerheid in de met SOBEK berekende afvoer door de IJssel is immers gebruikt als invoer voor WAQUA. Omdat er in WAQUA echter meer kan worden gedetailleerd dan in SOBEK, is een compleet WAQUA-Rijntakkenmodel - met een constante maatgevende afvoer - waarschijnlijk nauwkeuriger.

De invloed van de onzekerheid in de modelparameters op de onzekerheid in de maatgevende hoogwaterstanden is eveneens onderzocht. De onzekerheid van de zomerbedruwheid heeft, tezamen met de correlatie in lengterichting, de grootste invloed op de onzekerheid in de waterstand. Hoe groter de onzekerheid van de zomerbedruwheid of hoe groter de correlatie in lengterichting, des te groter de onzekerheid in de maatgevende hoogwaterstanden. Zo wordt de 90%-nauwkeurighedsband van de MHW-stand van de IJssel bij Zutphen vergroot van ± 18 cm naar ± 31 cm, indien de correlatiecoëfficiënt wordt vergroot van 0,50 (gedeeltelijke afhankelijkheid) naar 0,95 (vrijwel volledige afhankelijkheid). In het geval van (bijna) onafhankelijkheid tussen de zomerbedruwheid in opeenvolgende riviertrajecten worden onzekerheden dus meer uitgemiddeld dan in het geval van volledige afhankelijkheid. Voor de locaties dichtbij de benedenranden daarentegen bepaalt de onzekerheid in de benedenstrooms opgelegde waterstanden voornamelijk de onzekerheid in de maatgevende hoogwaterstanden.



Figuur 3: Voorbeeld: onzekerheid van ± 10 cm in de gemiddelde bodemhoogte voor een traject van 500 meter.

Inrichtingsalternatieven

Voor vier binnen RVR gedefinieerde inrichtingsalternatieven zijn nauwkeurigheidsbanden van de maatgevende hoogwaterstanden bepaald. Deze vier inrichtingsalternatieven zijn: voortzetting van het huidige beleid, meer uiterwaardplannen en natuurontwikkeling, natuurontwikkeling met uitzondering van uiterwaarden met hoge landschap- en cultuurwaarden en maatregelen in de uiterwaarden tegen minimale kosten. De inrichtingsalternatieven zijn opgebouwd uit maatregelen die in te delen zijn in vier categorieën: kleinschalige maatregelen (verwijdering van hydraulische knelpunten zoals hoogwatervrije terreinen, kades, veerwegen, landhoofden van bruggen en sterke insnoeringen van dijken), grootschalige maatregelen (aanleg van retentiebekkens, grootschalige dijkverlegging, kribverlaging en zomerbedverdieping), uiterwaardplannen (diepe ontgrondingen, natuurontwikkelings- en recreatieplannen) en aanvullende maatregelen (uiterwaardverlaging met instandhouding van het landbouwkundig gebruik of met omzetting naar natte natuur). De bestudeerde alternatieven zijn combinaties van bovenstaande maatregelen, die er zorg voor dragen dat een eventuele toename van de maatgevende afvoer van 15.000 naar 16.000 m³/s niet resulteert in toename van de maatgevende hoogwaterstanden.

Nauwkeurigheid

Voor de vier inrichtingsalternatieven zijn de gemiddelde maatgevende hoogwaterstanden weliswaar per locatie verschillend, maar de groottes van de nauwkeurigheidsbanden komen vrijwel overeen. Alleen het inrichtingsalternatief 'meer uiterwaardplannen en natuurontwikkeling' geeft voor de IJssel iets grotere nauwkeurigheidsbanden. Dat is overigens een alternatief waarbij relatief veel uiterwaarden verlaagd worden. Hierdoor wordt de invloed van de bodemruwheid op de onzekerheid in de waterstanden vergroot.

Voor het bepalen van de nauwkeurigheidsbanden in de kosten van de inrichtingsalternatieven zijn de totale kosten van een inrichtingsalternatief uitgesplitst over de Rijntakken. Door sommatie van de kosten over alle takken worden de kosten van een inrichtingsalternatief verkregen. Per Rijntak zijn de kosten onderverdeeld in drie onzekere parameters: de hoeveelheid af te graven grond, de variabele kosten van het afgraven en verwerken van 1 m³ afgegraven grond en de vaste kosten zoals bodemonderzoek, natuurbeheer en grondonteigening.

In een Monte-Carlo-simulatie zijn random-waarden van zowel hoeveelheden als kosten uit de afzonderlijke kansverdelingen getrokken, rekening houdend met eventuele afhankelijkheden. Zo zijn er afhankelijkheden aangenomen tussen hoeveelheden en kosten van takken onderling. Uit deze simulatie blijkt dat de onzekerheden in de kosten van de vier inrichtingsalternatieven voor alle takken tezamen onderling weinig verschillen: de vier 90%-nauwkeurigheidsbanden zijn alle ongeveer gelijk aan $\pm 20\%$ van de verwachte kosten. In het algemeen hoeft het echter niet zo te zijn dat de nauwkeurigheidsbanden van verschillende inrichtingsalternatieven dezelfde verhouding hebben. Bij het 'Onderzoek Watersnood Maas' (1994) bleek bijvoorbeeld dat inrichtingsalternatieven met dijkverhogingen weliswaar duur zijn in vergelijking met alternatieven met verdiepingen, maar dat de onzekerheden in de hieraan verbonden kosten relatief klein zijn.

Nader onderzoek

Er is een methode gepresenteerd waarmee - gegeven de onzekerheden in de modelparameters van een waterbewegingsmodel - de onzekerheid kan worden geschat van de maatgevende hoogwaterstand. Op analoge wijze kunnen nauwkeurigheidsbanden van kosten worden geschat. Uit de uitgevoerde nauwkeurigheidsanalyse blijkt dat de onzekerheid van met name de zomerbedruwheid tezamen met de correlaties in lengterichting, alsmede de onzekerheden in de benedenstroomse randvoorwaarden, de belangrijkste onzekerheidsbronnen zijn. De onzekerheid in de zomerbedruwheid is dan ook een belangrijk aandachtspunt voor nader onderzoek.