



Ruben Dahm, ARCADIS, thans Deltares  
 Ans Eilfrink, Waterschap Veluwe  
 Saskia Burgers, Wageningen Universiteit

# Pragmatische gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse in het regionale waterbeheer

**De komende jaren voert Waterschap Veluwe maatregelen uit ter voorkoming van wateroverlast. Om de effecten hiervan in het oppervlaktewatersysteem te bepalen, gebruikt het waterschap detailmodellen van haar watersysteem. Vanwege het ontbreken van meetgegevens is kalibratie beperkt mogelijk. Om die reden heeft de stochastische gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse die het waterschap voor één stroomgebied uitvoerde, extra waarde. Met Monte Carlo-simulaties is op een pragmatische wijze inzichtelijk gemaakt welke parameters de grootste onzekerheid genereren in de maximale waterstand en het maximale debiet.**

In het kader van het Nationaal Bestuursakkoord Water onderzoekt Waterschap Veluwe of het watersysteem piekafvoeren ten gevolge van extreme hoeveelheden neerslag in korte tijd kan verwerken. Diverse maatregelen worden onderzocht of zijn reeds ingezet om wateroverlast te voorkomen, zoals het verbreden van watergangen, het automatiseren van stuwen of het aanwijzen van inundatiegebieden.

De gewenste mate van nauwkeurigheid van de modelresultaten wordt steeds groter, maar de detailmodellen hebben momenteel één belangrijke tekortkoming: ze zijn nauwelijks gekalibreerd<sup>1)</sup>. Het waterschap toetst met gebiedskenners de modelresultaten op plausibiliteit. Dit maakt het lastig én uitdagend om wateroverlast en de effecten van maatregelen te kwantificeren. Voor Waterschap Veluwe is het daarom van belang om meer grip te krijgen op de gevoeligheid van de modelparameters en daarmee de onzekerheid van de berekende waterstanden en debieten, wil ze met vertrouwen de aan wateroverlast gerelateerde uitdagingen oplossen.

Het voornaamste doel van deze studie is om op een pragmatische wijze inzichtelijk te maken welke parameters de grootste gevoeligheid in de modelresultaten geven en daaruit voortkomend de onzekerheid in waterstand- en afvoerberekeningen. Hiervoor is een stochastische analyse

gebruikt. Deze kennis maakt het mogelijk om de effectiviteit van maatregelen in perspectief van (on)zekerheid te plaatsen. Hierdoor krijgt een manager meer informatie tot zijn beschikking om, met het oog op ruimtelijke, economische en sociale implicaties van wateroverlastbeperkende maatregelen, beslissingen op te baseren.

Modelsimulaties bevatten verschillende onzekerheden. Allereerst moet men zich afvragen of de versimpelde weergave van de werkelijkheid het watersysteem correct weergeeft. Daarnaast kan men zich de vraag stellen hoe onzekerheden in de input zoals neerslagintensiteit en parameterwaarden door het simulatiemodel propageren en leiden tot onzekerheden in de resultaten<sup>2)</sup>. Deze studie richt haar aandacht op de onzekerheden van parameterwaarden.

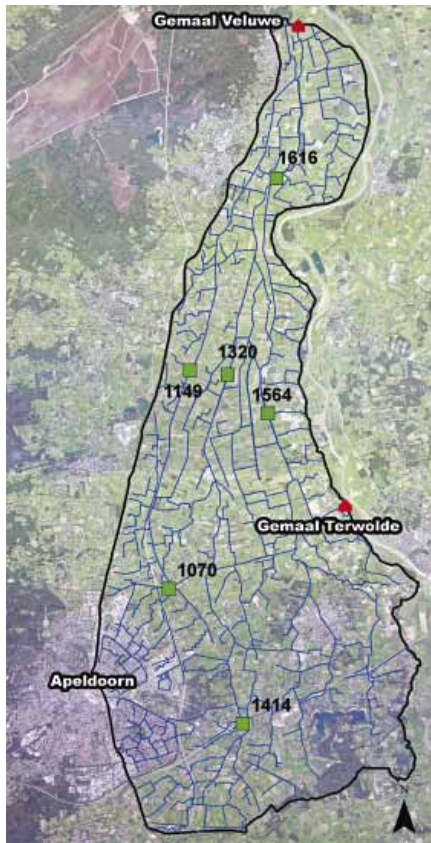
De resultaten van een gevoeligheidsanalyse zijn bruikbaar om risicobepalende parameters te identificeren en aanvullend onderzoek naar deze parameters te verrichten. Tegelijkertijd kan beperkt aandacht besteed worden aan minder gevoelige parameters (modelreductie). Men kan onderscheid maken in een deterministische en stochastische gevoeligheidsanalyse. Voor een deterministische gevoeligheidsanalyse is geen kennis van de variatie van een parameter nodig. Een voorbeeld is de verandering van de waarde van een parameter, bijvoorbeeld de drainage-

weerstand, met plus of min 25 procent. Deze methode wordt vaak gebruikt in het regionale waterbeheer. Voordelen zijn dat het een beeld geeft van het hele spectrum aan mogelijke resultaten en dat een beperkt aantal modelsimulaties noodzakelijk is. De parameters worden echter niet simultaan veranderd. Hierdoor ontstaat geen goed beeld van mogelijke interacties tussen parameters en niet-lineaire effecten op de modelresultaten.

Een stochastische gevoeligheidsanalyse verandert de parameters wel gelijktijdig en hanteert een verdeling voor de onzekerheid van elke parameter. Met een gevoeligheidsanalyse wordt de variantie van de modelresultaten toegewezen aan de verschillende bronnen van variatie in de invoervariabelen en modelparameters. De onzekerheid in de modelinvoer veroorzaakt een spreiding van de modelresultaten. Een onzekerheidsanalyse kwantificeert die onzekerheid in een gemiddelde, een variantie en een 95 procent betrouwbaarheidsinterval.

## Methodiek

Voor de gevoeligheidsanalyse en onzekerheidsanalyse zijn zes stappen uitgevoerd<sup>3),4)</sup>: selectie modelinvoer en parameters, bepaling van de verdeling van elke modelinvoer en parameter, het vaststellen van de onderlinge correlaties of restricties, het genereren van een invoermatrix volgens geschikt design, een simulatie en een analyse van de resultaten.



Afb. 1: De noordelijke IJsselvallei.

Aan de hand van een casus voor de noordelijke IJsselvallei worden onderstaand de details van elke stap beschreven.

### Studiegebied noordelijke IJsselvallei

Het stroomgebied van de noordelijke IJssel ligt in het oostelijk deel van het beheergebied van Waterschap Veluwe en is circa 21.000 hectare groot (zie kaart). Het gebied is hellend en loopt af richting het noorden met een totaal hoogteverschil van circa 15 meter. Het stroomgebied loost water op de IJssel door vrije afwatering en bemaling. Ten zuiden van het Toevoerkanaal watert de noordelijke IJsselvallei af via dit kanaal, waarbij een deel van het water afstromt naar de IJssel en een deel via automatische stuwen wordt doorgestuurd naar de weteringen ten noorden van het kanaal. Het watersysteem bestaat uit 457 km A-watgang en is geschematiseerd met SOBEK<sup>(5),6)</sup>.

### Uitgangspunten

Waterschap Veluwe hanteert als uitgangspunt een wintersituatie met de peilen op streefniveau. Via de gemalen Terwolde en Veluwe loost het systeem op de IJssel. Een neerslagsituatie waardoor wateroverlast kan ontstaan, vormt het uitgangspunt voor de gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse. In deze studie gebruikt het waterschap voor de berekening van een extreme waterstandsituatie de STOWA-neerslagpatronen en -intensiteiten<sup>7)</sup> en onderzoekt de effecten van twee neerslagpatronen. Gebiedskenners geven aan dat het watersysteem vaak voor overlast zorgt na het optreden van neerslag volgens de patronen 'hoog' en '2 piek kort'. Het waterschap

gebruikt een neerslagvolume met een herhalingsstijg van één keer per tien jaar (109 millimeter in 216 uur).

Bij wijze van experiment is gekozen voor een groot aantal parameters. Samen met hydrologen en gebiedskenners van Waterschap Veluwe, en afgestemd op de modelstructuur van SOBEK, zijn 13 parameters onderzocht voor zowel het neerslagafvoerproces (parameters 1-10) als het hydrodynamische gedeelte (parameters 11-13) (zie tabel 1). De modelinvoer (neerslagpatroon en -volume) vormt geen onderdeel van de analyses.

### Vaststellen van de verdeling

De onzekerheid van een parameterwaarde is weergegeven in de vorm van een kansverdeling. Voor de vorm van die verdelingen zijn nauwelijks bronnen gevonden. Daarom is ervoor gekozen om de verdelingen op een pragmatische wijze op te stellen. Hiervoor zijn literatuur en *expert judgement* over parameters en modelsystemen gebruikt. Vervolgens zijn de karakteristieke kenmerken van een verdeling bepaald. Voor elke parameter is nagedacht over de fysische bandbreedte in het stroomgebied van de noordelijke IJssel. Onderzoek geeft aan dat de vorm van de verdeling een significant effect uitoefent op de modelresultaten en toegekende gevoeligheid van een parameter<sup>8)</sup>. Het woord 'pragmatisch' slaat daarom vooral op het feit dat we accepteren dat we weinig informatie vonden over de te gebruiken verdelingen en daardoor keuzes hebben gemaakt om toch een gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse uit te voeren. Voor de geïnteresseerden is in tabel 1 het overzicht van de parameters, de gekozen verdelingen en het bereik van de parameterwaarden opgenomen.

Onderlinge restricties of correlaties zijn niet aangenomen. Dat maakt alle combinaties van parameterwaarden mogelijk. De combinatie 'initiële grondwaterstand' en 'weerstandcoëfficiënt watergangen' had mogelijk een restrictie kunnen krijgen. In de praktijk zal een hoge grondwaterstand

(representatiever voor een wintersituatie) nauwelijks tegelijkertijd voorkomen met een hoge mate van begroeiing (representatiever voor een zomersituatie). Deze restrictie is niet opgelegd. In totaal heeft vijf procent van de berekeningen deze combinatie. De verwachting is dat dit geringe aantal de resultaten nauwelijks beïnvloedt.

### Ontwerp en simulaties

Het effect op de modelresultaten van het 'niet weten welke waarde een parameter precies heeft' is onderzocht door de waarden van 13 parameters simultaan te laten variëren in elke SOBEK-berekening. Met een Latin Hypercube sample (LHS) is voor elke parameter een waarde getrokken uit de specifieke verdeling van tabel 1. Latin Hypercube is een efficiënte methode, omdat minder simulaties nodig zijn dan bij Monte Carlo, terwijl de gehele parameter ruimte wel wordt afgedekt. Bij een LHS-trekking wordt de kansverdeling van de parameter in stukken verdeeld die een gelijke kans van voorkomen hebben. Vervolgens wordt in ieder interval één trekking zo genomen dat iedere combinatie van rij en kolom één keer voorkomt. In totaal heeft het waterschap 650 simulaties uitgevoerd.

### Analyse en resultaten

Wat betekent dit nu voor de casestudie van de noordelijke IJsselvallei? Samen met gebiedskenners zijn zes locaties gekozen waarvoor de simulaties zijn geanalyseerd. Voor elke simulatie zijn zowel de maximale waterstanden en debieten als de tijdreeks geanalyseerd.

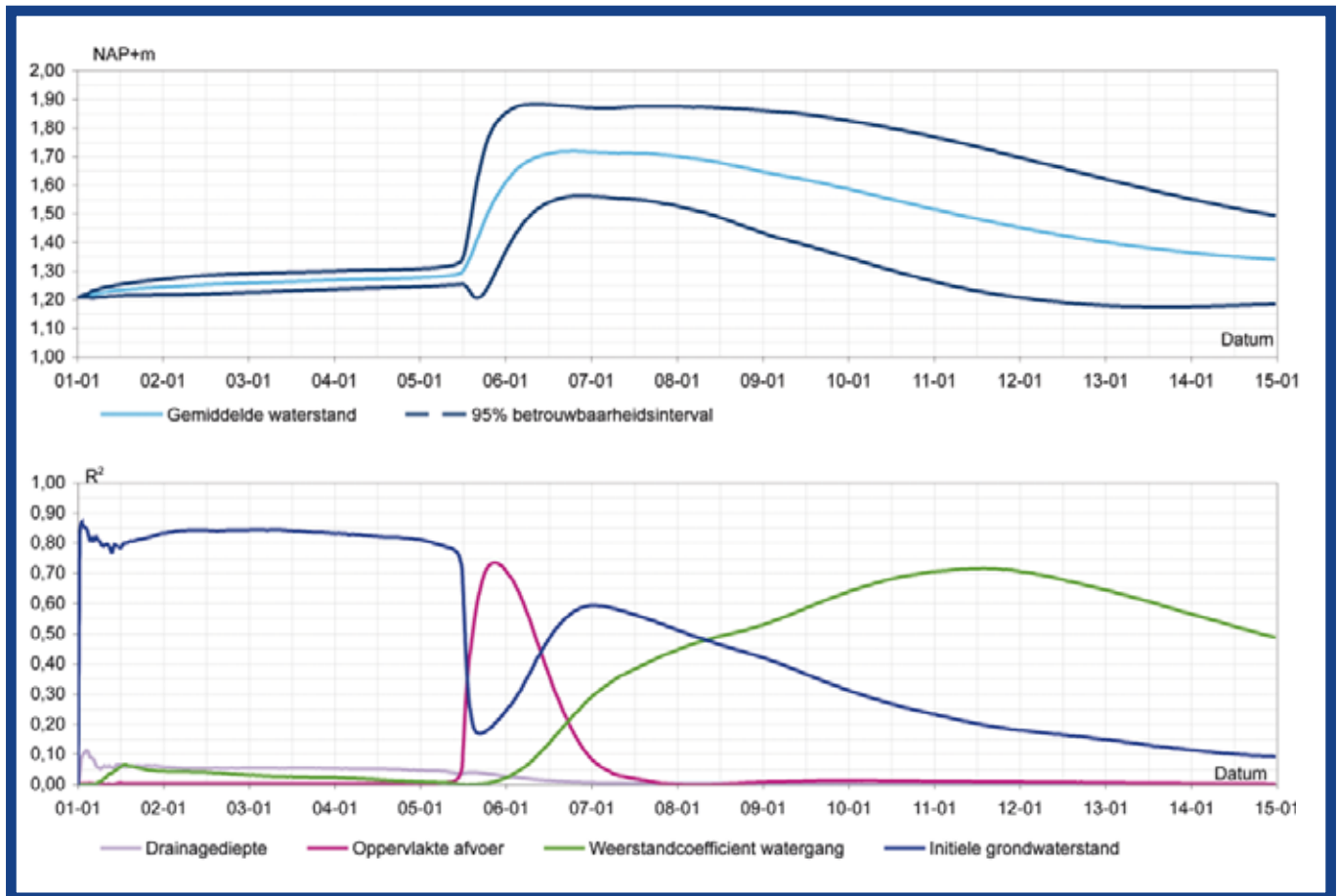
Voor de gevoeligheidsanalyse is onderzocht welke variantie in de maximale waterstanden en debieten is toe te wijzen aan de onzekerheden in de parameterwaarden. Hiervoor is gebruik gemaakt van de Top Marginal Variance (TMV), ook wel de *first order sensitivity index* genoemd<sup>(3),9)</sup>. De TMV van een parameter is de reductie in variantie van de modelresultaten die het waterschap krijgt als de parameterwaarde volledig bekend is, terwijl de kennis van de overige parameters even onzeker blijft. Dit betekent

Tabel 1: Overzicht parameters en verdelingen.

| parameter (eenheid)                                    | verdeling | gemiddelde | standaarddeviatie | ondergrens | bovengrens |
|--|-----------|------------|-------------------|------------|------------|
| 1 berging op maaiveld (mm)                             | gamma     | 4          | 1                 |            |            |
| 2 vertragsfactor overstort (1/min)                     | gamma     | 0,025      | 0,01              |            |            |
| 3 intreeweerstand (dag)                                | gamma     | 150        | 100               | 50         |            |
| 4 drainage diepte (m - maaiveld)                       | gamma     | 1,5        | 0,2               | 0,9*       |            |
| 5 drainageweerstand (dag)                              | normaal   | 125        | 12,5              |            |            |
| 6 berging op verhard oppervlak (mm)                    | uniform   |            |                   | 1          | 3          |
| 7 oppervlakte afvoer (dag)                             | uniform   |            |                   | 0,1        | 1,5        |
| 8 infiltratiecapaciteit zand (mm/uur)                  | uniform   |            |                   | 20         | 40         |
| 9 infiltratiecapaciteit klei (mm/uur)                  | bèta      | 1,5        | 0,3               | 1          | 5          |
| 10 initiële grondwaterstand (m + streefpeil)           | bèta      | 0,35       | 0,15              | 0,1        | 0,75       |
| 11 weerstandcoëfficiënt watergang** (s <sup>-1</sup> ) | bèta      | 20         | 4                 | 5          | 30         |
| 12 weerstandcoëfficiënt duiker (m <sup>1/3</sup> /s)   | bèta      | 75         | 7                 | 60         | 100        |
| 13 afvoercoëfficiënt stuw (-)                          | bèta      | 1,05       | 0,1               | 0,85       | 1,3        |

\* De minimumdikte van de eerste drainagelaag bedraagt 0,9 meter.

\*\* Toepassing van De Bos en Bijkerk-relatie tussen de Manning weerstandcoëfficiënt en de waterdiepte.



Afb. 2: Tijdsafhankelijke onzekerheidsanalyse (boven) en gevoeligheidsanalyse (onder) voor locatie 1616: de Grote Wetering (zie kaart).

dat als de parameter 'weerstandcoëfficiënt watergang' een TMV heeft van 38 procent voor de modeluitvoer 'maximale waterstand', de variantie van de maximale waterstanden met circa 40 procent kan worden verminderd als de mate van begroeiing bekend is. Met regressietechnieken is onderzocht welke parameters de modelresultaten grotendeels verklaren.

Tabel 2 toont dat de TMV voor de parameters 'initiële grondwaterstand' en 'weerstandcoëfficiënt watergang' groot is. Deze parameters verklaren samen meer dan driekwart van de variantie in de maximale waterstand en het maximale debiet voor beide neerslagpatronen. De parameters 'drainagediepte' en 'oppervlakte afvoer' scoren regelmatig een TMV van vijf tot tien procent. De overige negen parameters

oefenen nauwelijks invloed uit op de maximale waterstanden en maximale debieten. In de onzekerheidsanalyse is gekeken naar het 95 procent betrouwbaarheidsinterval rondom de maximale waterstand en debiet. Voor de onderzochte locaties bedraagt dit interval plus of min 20 cm rondom de gemiddelde maximale waterstand van alle simulaties. Voor het maximaal opgetreden debiet geldt dat de bovengrens van het interval gemiddeld 2,3 keer zo groot is als de ondergrens.

Het is voor de toetsing aan het Nationaal Bestuursakkoord Water belangrijk de gevoeligheid en onzekerheid van de maximale waarden te weten. Daarnaast geeft een tijdsafhankelijke gevoeligheidsanalyse extra informatie over het moment waarop de verschillende parameters hun invloed laten

gelden (zie afbeelding 2). Als voorbeeld is neerslagpatroon 'hoog', locatie 1616 gekozen. De gevoeligheidsanalyse voor de maximale waarden maakt inzichtelijk dat de parameter 'oppervlakte afvoer' met een TMV van 17,2 procent redelijk belangrijk is. Een tijdsafhankelijke gevoeligheidsanalyse met alleen lineaire regressie maakt duidelijk dat een dag voordat de maximale waterstand optreedt, de parameter 'oppervlakte afvoer' meer dan 70 procent van de onzekerheid in de waterstand bepaalt. Na de maximale waterstand neemt de invloed van parameter 'weerstandcoëfficiënt watergang' langzaam toe.

### Discussie

In 2007 voerde WL|Delft Hydraulics een deterministische gevoeligheidsanalyse uit voor het model van de noordelijke IJssel-

Tabel 2: De reductie in variantie van de modelresultaten van beide neerslagpatronen voor de maximale waterstand en het maximale debiet.

| Maximale waterstand               | Maximale waterstand    |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      | Maximaal debiet        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                   | Neerslagpatroon 'hoog' |      |      |      |      |      | Neerslagpatroon '2 Plek kort' |      |      |      |      |      | Neerslagpatroon 'hoog' |      |      |      |      |      | Neerslagpatroon '2 Plek kort' |      |      |      |      |      |
|                                   | 1070                   | 1149 | 1320 | 1414 | 1564 | 1616 | 1070                          | 1149 | 1320 | 1414 | 1564 | 1616 | 1070                   | 1149 | 1320 | 1414 | 1564 | 1616 | 1070                          | 1149 | 1320 | 1414 | 1564 | 1616 |
| Parameter                         |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Berging op maaiveld               |                        |      |      |      |      | 1,6  |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Vertragsfactor overstort          |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Intreeweestand                    |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Drainagediepte                    |                        |      |      |      |      | 0,9  |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Drainageweerstand                 |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Berging op verhard oppervlak      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Oppervlakte afvoer                |                        |      |      |      |      | 17,2 |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Infiltratiecapaciteit zand        |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Infiltratiecapaciteit klei        |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Initiële grondwaterstand          |                        |      |      |      |      | 51,7 |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Weerstandcoëfficiënt watergang    |                        |      |      |      |      | 25,3 |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Weerstandcoëfficiënt duiker       |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Afvoercoëfficiënt stuw            |                        |      |      |      |      | 0,2  |                               |      |      |      |      |      |                        |      |      |      |      |      |                               |      |      |      |      |      |
| Totaal verklaarde variantie (TMV) | 97,9                   | 96,6 | 98,4 | 96,1 | 92,0 | 96,9 | 96,6                          | 95,5 | 97,7 | 96,6 | 95,2 | 98,1 | 90,3                   | 88,8 | 84,9 | 88,9 | 76,5 | 78,0 | 95,0                          | 99,0 | 96,6 | 99,3 | 90,5 | 96,4 |



**Wateroverlast in de IJsselvallei (foto: Wim Visscher).**

vallei<sup>1)</sup>. Als neerslagsituatie is 'september 1957' inclusief voorgeschiedenis gebruikt. De voornaamste conclusie was dat het modelleren van de weerstandcoëfficiënt met zorg dient te gebeuren. Het toepassen van een Manning weerstandcoëfficiënt van 15 of  $34 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  leidde tot een verschil in waterstand van orde grootte vijf tot 21 cm. Daarnaast had de verandering van drainageweerstand ( $\pm 20$  procent) een gering effect (-6 cm tot +4 cm). De mate van invloed van deze parameter komt overeen met de bevindingen uit deze studie.

### Conclusie

De stochastische gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse van het SOBEK-model noordelijke IJsselvallei leert Waterschap Veluwe dat de parameters 'initiële grondwaterstand' en 'weerstandcoëfficiënt watergang' extra aandacht verdienen bij het simuleren van wateroverlast indien een neerslagsituatie zonder voorgeschiedenis wordt gebruikt. Voor hydrologen waarschijnlijk geen verrassing, maar als het waterschap deze twee parameters correct weet te schatten/schematiseren, dan neemt gemiddeld genomen de variantie in de voorspelde maximum waterstand met 75 procent af. Daarnaast verdienen de parameters 'drainagediepte', 'drainageweerstand' en 'oppervlakte afvoer' uitvoerige aandacht. Aanvullend onderzoek kan inzicht

geven in het effect van de keuze voor een bepaalde verdeling.

### Aanbevelingen

De studie geeft vier belangrijke aanbevelingen:

- Gebruik een neerslagsituatie met voorgeschiedenis, zodat de 'initiële grondwaterstand' minder effect heeft op de modelresultaten en de onzekerheid afneemt;
- Onderzoek de mate van begroeiing, het hydrodynamische effect van gebiedsspecifieke waterplanten en de wijze van modelschematisatie;
- Reduceer het aantal parameters in een gevoeligheidsanalyse van 13 naar 5: initiële grondwaterstand, weerstandcoëfficiënt watergangen, oppervlakte afvoer, drainagediepte en drainageweerstand;
- Analyseer de modelresultaten tijdsafhankelijk om meer inzicht in de gevoeligheid van parameters en in de onzekerheid van de modelresultaten te krijgen.

### LITERATUUR

- 1) Verschelling E. (2007). Evaluatie SOBEK-modellerings Waterschap Veluwe. WL|Delft Hydraulics.
- 2) Van der Klis H. (2003). Uncertainty analysis applied to numerical models of river bed morphology. Ph.D. thesis.
- 3) Saltelli A., K. Chan en E. Scott (2000). Sensitivity analysis. John Wiley & Sons, pag. 475.

- 4) Van den Brink C., W. Zaadnoordijk, S. Burgers en J. Griffioen (2008). Stochastic uncertainties and sensitivities of a regional-scale transport model of nitrate in groundwater. *Journal of Hydrology* 361, pag. 309-318.
- 5) HKV Lijn in water (2005). Modelstudie Noordelijke IJsselvallei.
- 6) Waterschap Veluwe (2007). Stroomgebieduitwerkingsplan Noordelijke IJsselvallei.
- 7) STOWA (2004). Statistiek van extreme neerslag in Nederland. Rapport 2004-26.
- 8) Benke K., K. Lowell en A. Hamilton (2008). Parameter uncertainty, sensitivity analysis and prediction error in a water-balance hydrological model. *Mathematical and computer modelling* 47, pag. 1134-1149.
- 9) Jansen M., W. Rossing en R. Daamen (1994). Monte Carlo estimation of uncertainty contributions from several independent multivariate sources. *Predictability and Nonlinear Modelling in Natural Sciences and Economics*, pag. 334-343.