
Koppeling van een inundatie- en grondwatermodel voor de uiterwaarden

André Blonk, Marcel Boerefijn, Jan Hoogendoorn en Martin de Haan

Waterleidingbedrijf Vitens werkt aan de gedeeltelijke verplaatsing van de waterwinning Het Engelse Werk te Zwolle. De aanleiding hiervoor is ondermeer de toestromende verontreiniging vanuit het nabijgelegen stedelijke gebied. Het nieuwe puttenveld komt binnendijks te liggen, min of meer parallel aan de winterdijk. Als gevolg hiervan treedt er een verlaging op van de grondwaterstand in de uiterwaarden. Het nauwkeurig in beeld brengen van dit effect is van belang in verband met de voorkomende natuurwaarden en de beschermde status van het gebied. Anderzijds worden de effecten van de winning beperkt door de infiltratie van IJsselwater in de uiterwaarden bij een situatie met hoog water (inundatie). Ook dit effect is van belang voor de vergunningverlening.

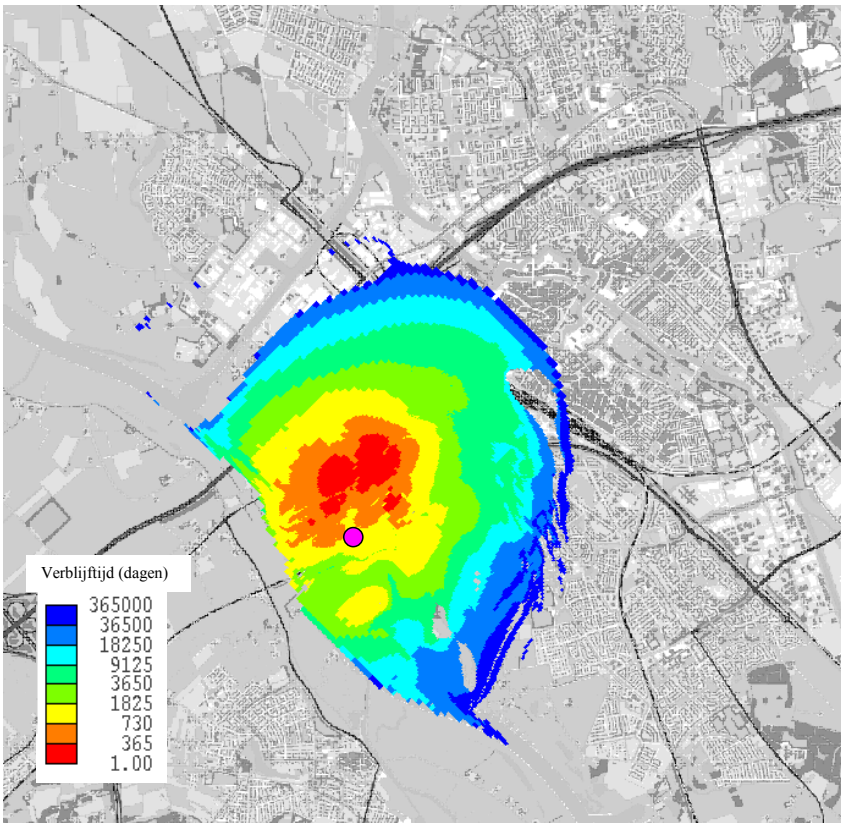
Genoeg redenen dus voor het uitvoeren van een gedegen modelonderzoek naar de invloed van de winning op de uiterwaarden en vice versa. Hierbij is een grondwatermodel (MODFLOW) gekoppeld aan een speciaal voor deze studie ontwikkeld inundatiemodel. In dit artikel beschrijven we ondermeer de koppeling van de modellen en de ijkingen validatie van het gekoppelde model op basis van harde en zachte meetgegevens.

Systeemanalyse

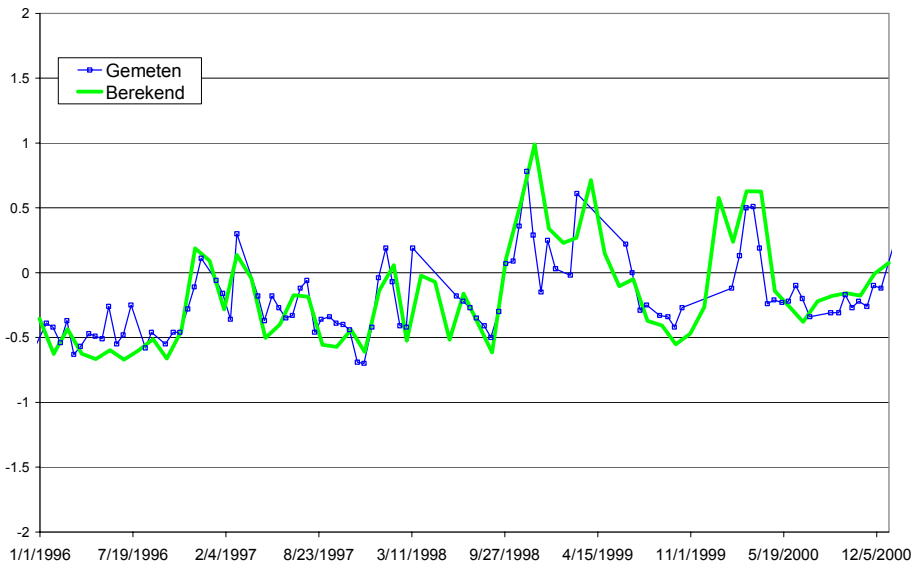
Het pompstation Engelse Werk is voor een groot deel een oevergrondwaterwinning nabij de IJssel. Circa 65% van het opgepompte grondwater bestaat uit geïnfiltreerd rivierwater. De uiterwaarden van de IJssel zijn aangewezen als vogelrichtlijngebied en worden sterk beïnvloed door de inundatiefrequentie en inundatieduur. Met name de lokale laagtes waarin het IJsselwater lang blijft staan spelen hierbij een rol.

In het invloedsgebied van de winning komen belangrijke natuurwaarden voor die afhankelijk zijn van het grondwater. Veranderingen in de waterhuishouding kunnen deze natuurwaarden direct beïnvloeden. Voor de vaststelling van ecologische effecten zijn de GHG, de GLG en de kweldruk relevant. Daarnaast zijn voor de plantengroei en de fauna in de uiterwaarden de inundatieduur en de verandering ervan van belang (Aggenbach en Pelsma, 2005; Sierdsema, 1995).

André Blonk en Marcel Boerefijn zijn werkzaam bij Tauw, Jan Hoogendoorn bij Vitens en Martin de Haan bij Kiwa Water Research.



Figuur 1: Berekend intrekgebied van het pompstation Engelse Werk, de locatie van peilbuis 21GP0457 is weergegeven met een rode stip.



Figuur 2: Berekende en gemeten stijghoogte peilbuis 21GP0457 (m+NAP).

Modellering grondwaterstroming

Het grondwatermodel is opgezet als een instationair MODFLOW-model met cellen van $25 \times 25 \text{ m}^2$ in het interessegebied. De toegepaste rekenperiode is van 1 januari 1996 t/m 31 december 2000. Deze periode is gediscretiseerd tot 60 zogenaamde stressperioden van één maand. Om het model goed ingespeeld te krijgen is een voorperiode van 10 jaar gehanteerd (1 januari 1986 t/m 31 december 1995) welke als één aparte stressperiode is gemodelleerd. De resultaten van het MODFLOW-model zijn in figuur 1 en figuur 2 gepresenteerd als:

- het intrekgebied van het pompstation Engelse Werk;
- een tijdstijghoogtelijn (peilbuis 21GP0457, $x = 201350$, $y = 501015$).

Modelleren van inundatie

Voor de modellering van de inundatie in de uiterwaarden zijn verschillende oplossingsrichtingen beschouwd. Eén van deze opties betreft het gebruik van de zogenaamde 'rewet'-optie binnen MODFLOW. Voor het toepassen van deze methode moet een extra modellaag bovenop de reeds bestaande 18 modellen worden aangebracht. Aan deze modellaag wordt vervolgens een bergingscoëfficiënt van 1 toegekend. Afhankelijk van de berekende stijghoogte in de 2e modellaag (= bovenkant WVP1) kan de nieuwe bovenste modellaag onderlopen en weer droogvallen. Achteraf bleek deze rekenexercitie geen zinvolle optie te zijn. Het rekenproces convergeerde zeer moeizaam en het leidde tot zeer lange rekentijden.

Voor de ecologische effectvoorspelling was dit onvoldoende. Tevens bestond voor de ecologische effectvoorspelling de behoefte aan een grotere mate van detail in de ruimte (circa $5 \times 5 \text{ m}^2$ in plaats van $25 \times 25 \text{ m}^2$).

Gekozen is voor het ontwikkelen van een inundatiemodel op basis van het Actueel Hoogtebestand van Nederland (AHN). Dit model vergelijkt waterstanden van de IJssel met maaiveldhoogten. Als het maaiveld lager is dan het IJsselpeil en als het water ongehinderd naar deze locatie kan stromen, dan inundeert de betreffende locatie. Hierbij is een AHN maaiveldhoogtebestand toegepast met een resolutie van $5 \times 5 \text{ m}^2$. Het hoogtemodel heeft dezelfde afmetingen als het MODFLOW-model. Het berekent de inundatie over de periode 1996–2000 met een tijdstap van 1 dag (1827 tijdstappen).

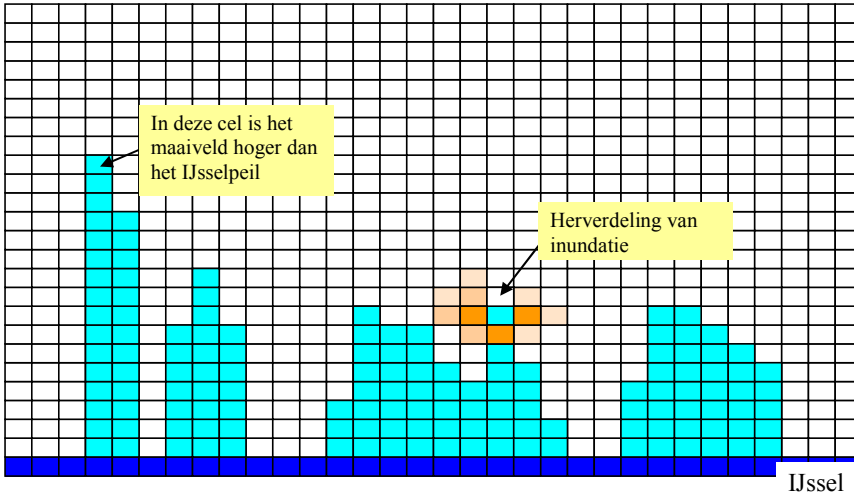
Uitwerking inundatiemodel

Rekenteknik

De gridcellen van het inundatiemodel komen overeen met de gridcellen van het AHN. Ter plaatse van de IJssel krijgen de cellen een code 1 toegekend. Deze code staat voor een opgelegde randvoorwaarde, te weten de rivierstand. De overige cellen van het model netwerk krijgen een code 0 toegekend. Deze code betekent dat de cel kan inunderen afhankelijk van de rivierstand.

In het inundatiemodel wordt in eerste instantie per kolom vanuit de IJssel landinwaarts gekeken of het maaiveld in een cel lager is dan het peil van de IJssel. Zo ja, dan loopt deze cel onder. Vervolgens wordt in dezelfde modelkolom de daaropvolgende cel in de daarboven liggende rij getoetst volgens dit criterium. Vanuit de IJssel ontstaat zo een ondergelopen raai tot aan een cel waar het maaiveld hoger is dan het peil van de IJssel.

Er ontstaat zo een vingerpatroon van ondergelopen raaien (figuur 3). In tweede instantie wordt voor elke ondergelopen cel naar de vier omringende buurcellen gekeken. Ook voor deze vier cellen wordt onderzocht of het betreffende maaiveld lager ligt dan het peil van de geïnundeerde centrale cel. Zo ja, dan kan deze naburige cel ook onderlopen. Het netwerk wordt op deze wijze doorlopen totdat er geen cellen meer inunderen. Na deze herverdeling zijn alle cellen welke door de IJssel bereikt kunnen worden ondergelopen.



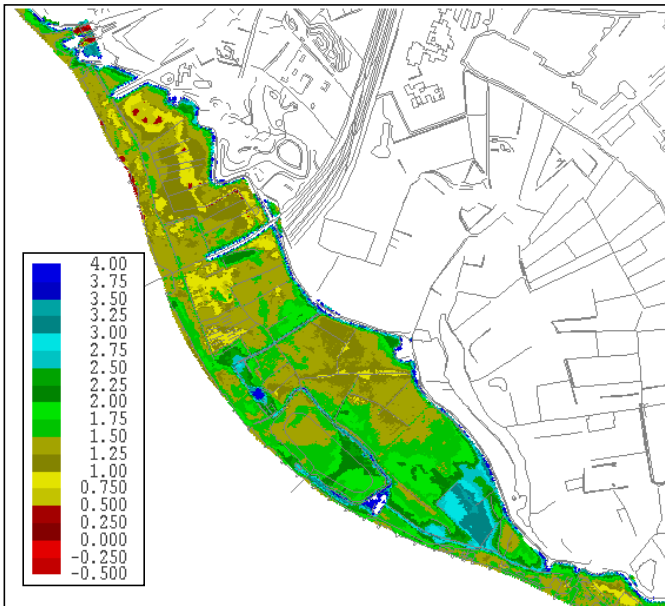
Figuur 3: Principe van inundatie door het onderlopen van cellen met een maaiveldhoogte lager dan het rivierpeil.

Bepaling lokale maaivelddepressies

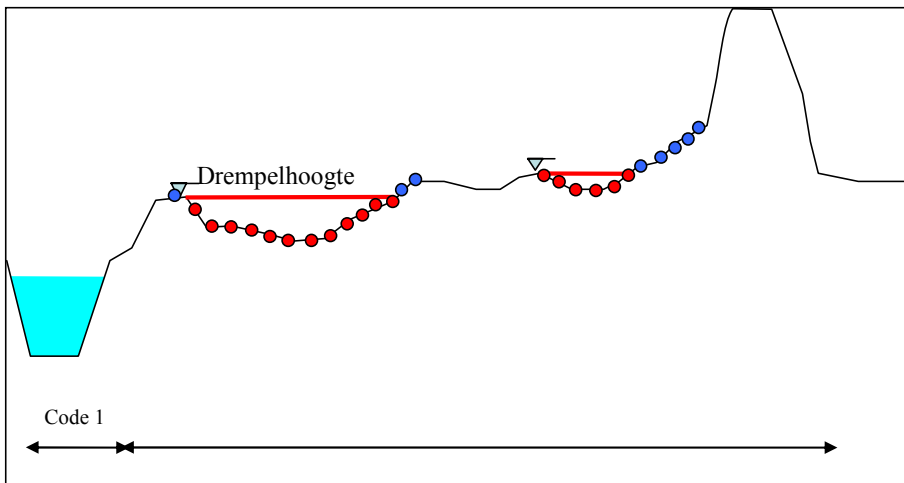
Bij het zakken van het rivierpeil zullen de cellen afhankelijk van het rivierpeil en de maaiveldhoogte weer droogvallen. In werkelijkheid zullen er echter in lokale maaivelddepressies waterplassen achterblijven waarvan het peil niet meer bepaald wordt door het peil van de rivier.

Deze lokale maaivelddepressies zijn als volgt bepaald.

Voor elke cel in het inundatiemodel wordt een gebied bepaald bestaande uit alle aanliggende cellen waarvan het maaiveld lager is dan de betreffende cel. Wanneer dit cluster van cellen niet in contact komt te staan met de IJssel dan maakt de oorspronkelijke cel onderdeel uit van een lokale maaivelddepressie en wordt deze als zodanig gekenmerkt (rode punten in figuur 5). Deze exercitie wordt voor alle cellen uitgevoerd. Aaneengesloten celengroepen vormen op deze wijze een lokale maaivelddepressie. De drempelhoogte van de depressie wordt vervolgens bepaald door voor elke lokale maaivelddepressie (aaneengesloten groep rode punten) de maximale maaiveldhoogte te berekenen (figuur 6).

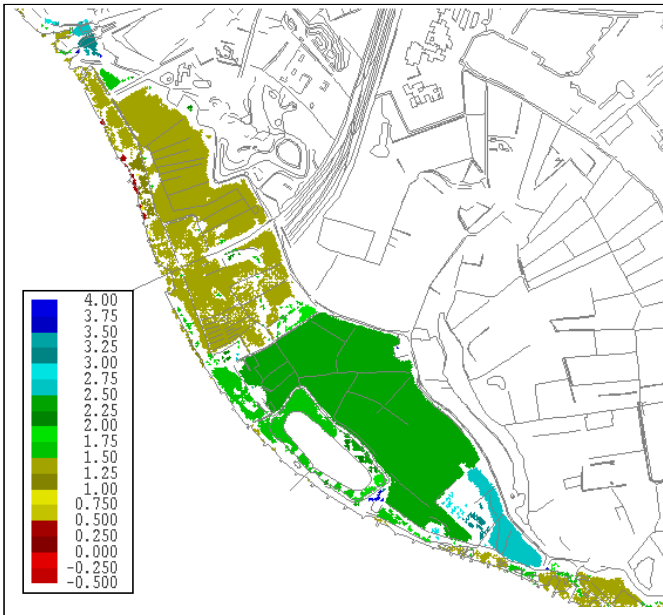


Figuur 4: Maaiveldhoogten inundatiemodel gebaseerd op het AHN (m+NAP).



Figuur 5: Schematische weergave van de berekeningsmethodiek voor lokale maaivelddepressies. De rode modelcellen liggen in een lokale depressie met bijhorende drempelhoogte.

Bij het dalen van het IJsselveil daalt de waterstand in de uiterwaard in eerste instantie één op één mee totdat bijvoorbeeld het IJsselveil de drempelhoogte van een lokale depressie bereikt. Vanaf dat moment zal de daling van de waterstand binnen de depressie geen één op één relatie meer hebben met de daling van de IJsselstand. De waterstand binnen de maaivelddepressie wordt dan bepaald door kunstmatige afvoer (bemaling en duikers) en door natuurlijke processen zoals infiltratie, neerslag en verdamping.



Figuur 6: Berekende lokale maaivelddepressies met hun drempelhoogte (m+NAP).

Kunstmatige leegloop van de lokale depressies

In de uiterwaarden bevinden zich twee gemaaltjes van het waterschap. Met deze gemaaltjes worden de twee grootste lokale maaivelddepressies (badkuipen) in het groeiseizoen zo veel als mogelijk drooggemalen. Daarnaast bevinden zich in de twee genoemde 'badkuipen' op enkele plaatsen afsluitbare duikers waarmee, bij voldoende lage IJsselstand, in het voorjaar via vrij verval wordt ontwaterd. De duikers worden beheerd door de agrariërs in het gebied.

Voor de modellering van de kunstmatige leegloop is een volgende methode gevolgd.

Navraag bij boeren in het betreffende gebied leert dat bij een volledig geïnundeerde badkuip dit gebied in circa één maand met duikers en gemaaltjes wordt drooggelegd. In het model is verondersteld dat de duiker of het gemaal zich op het laagste maaiveldniveau bevindt in de lokale depressie. Verder wordt verondersteld dat de duiker wordt opengezet nadat het IJsselpeil is gedaald onder het minimumpeil van de depressie (de duiker is dan pas bereikbaar).

De leegloop via de duiker wordt gemodelleerd volgens de wet van Torricelli welke kan worden beschreven met de volgende Q-H-relatie:

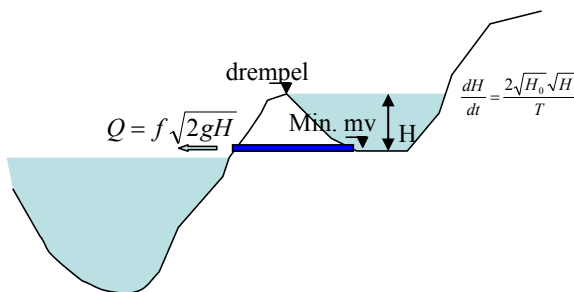
$$Q = f \sqrt{2gH}$$

Hierin is f een nader te bepalen factor afhankelijk van de leeglooptijd.

De leegloop flux kan worden berekend als:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{2\sqrt{H_0}\sqrt{H}}{T_{leegloop}}$$

In deze vergelijking is H_0 het peil van een volledig gevulde badkuip (drempelhoogte minus het minimum maaiveldniveau). De variabele H is gelijk aan het inundatiepeil in de badkuip. In figuur 7 is het principe van de leegloop berekening van de badkuip weergegeven.



Figuur 7: Principe van de leegloopberekeningen.

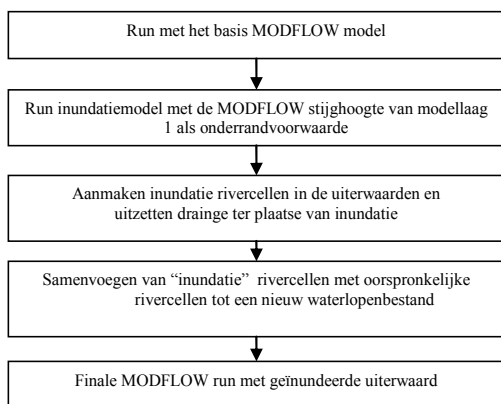
Natuurlijke leegloop van de depressies

In de depressies zonder gemaaltjes en/of duikers wordt de inundatieduur bepaald door infiltratie, neerslag en verdamping. De omvang van de infiltratie wordt berekend door in het inundatiemodel de stijghoogte van het watervoerend pakket als onderrandvoorwaarde te hanteren. De omvang van de infiltratie wordt vervolgens berekend uit de stijghoogtegradiënt en de weerstand van de deklaag.

Koppeling tussen grondwater- en inundatiemodel

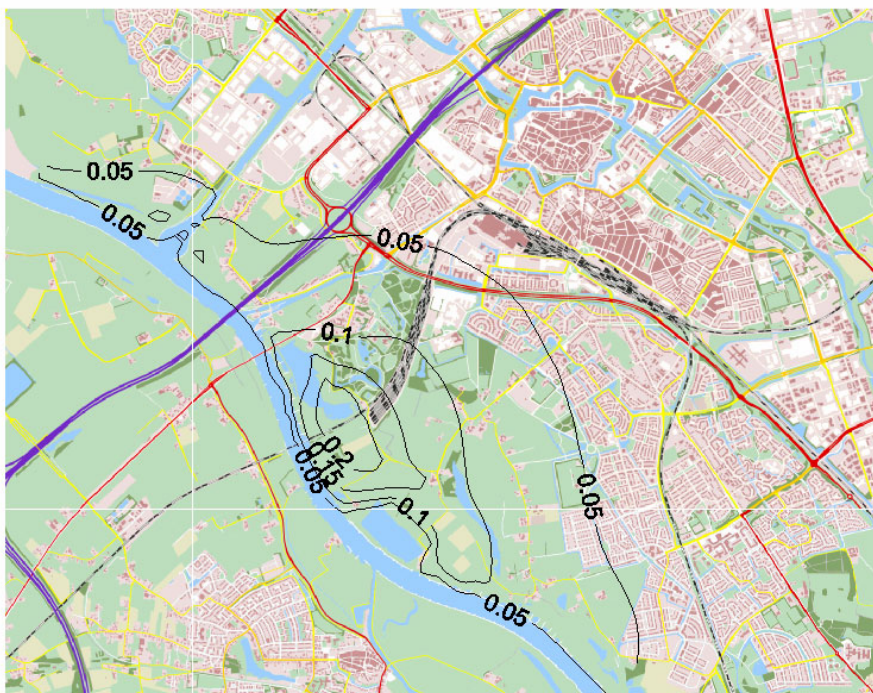
Inundatie van de uiterwaard is van invloed op de binnen- en buitendijkse grondwaterstroming. Beide modellen zijn daarom gekoppeld. De uitkomsten van het inundatiemodel worden daarbij omgezet naar rivercellen voor het MODFLOW-model. Alle in het inundatiemodel ondergelopen cellen worden in de tijd en ruimte opgeschaald naar MODFLOW rivercellen en worden vervolgens samengevoegd met de overige rivercellen. De drainage in de uiterwaard wordt bij de geïnundeerde cellen tijdelijk uitgeschakeld.

Voor een modelberekening (grondwatermodel – inundatiemodel) is een zogenaamde ‘modellentrein’ opgesteld welke is opgebouwd uit de volgende onderdelen:



Figuur 8: Koppeling tussen grondwater- en inundatiemodel.

Voor december 1998 is het effect van het inunderen van de uiterwaard op de ondiepe stijghoogte vastgesteld door het verschil te bepalen tussen stap 1 (alleen MODFLOW) en stap 5 (koppeling met inundatiemodel). Het effect bedraagt maximaal circa 0,20 m ter plaatse van de uiterwaard en dempt landinwaarts uit tot enkele centimeters.



Figuur 9: Effect van de inundatie in de uiterwaarden op de ondiepe stijghoogte (m verhoging door inundatie). Het betreft het verschil tussen een MODFLOW run met en zonder inundatie (december 1998).

Toetsing van de modeluitkomsten

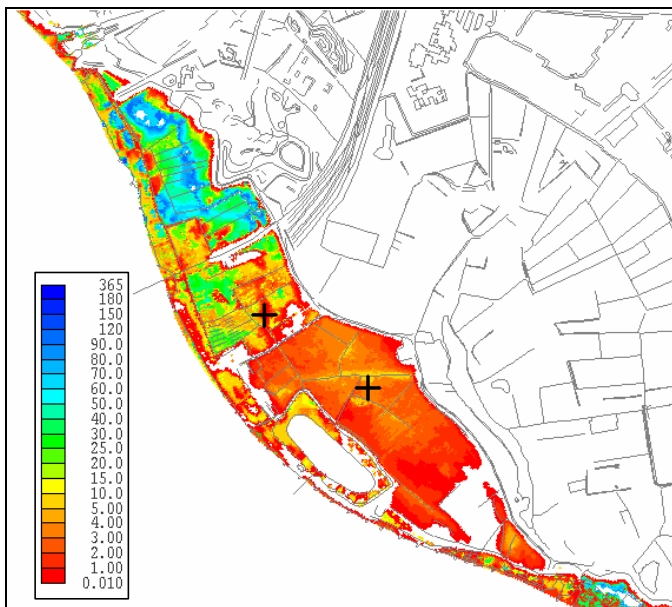
Het MODFLOW-model is primair geijkt op basis van gemeten grondwaterstanden. Tevens is bij de ijking gebruik gemaakt van bekende stromingspatronen van verontreinigingen vanuit de stad en vanuit de IJssel. De bekende stromingsrichting en stroomsnelheid van deze verontreinigingen is daarbij vergeleken met de modeluitkomsten.

De berekende inundatiediepte en inundatieduur zijn gevalideerd op 'zachtere' gegevens. Het betreft allereerst de kennis van een gebiedsdeskundige die in de uiterwaarden is geboren en het gebied nu ruim 50 jaar kent. Hij weet uit ervaring welke gebieden als eerste onderlopen, welke gebieden het laatste weer droog zijn etc. Vervolgens is in overleg met de betrokken ecologen geverifieerd of de berekende inundatieduur/inundatiediepte overeenkomt met de gewenste abiotische randvoorwaarden van de aanwezige vegetatie in het gebied. De validatie op basis van gebiedskennis en vegetatie hebben naar ons idee geleid tot een betrouwbaar watersysteemmodel waarmee de hydrologische effecten van de verschillende verplaatsingsalternatieven op adequate wijze kunnen worden doorgerekend. Het modelinstrumentarium is inmiddels ook toegepast bij een studie in het kader van Ruimte voor de Rivier. Hierbij zijn de effecten berekend van een nieuw te graven negengeul op de inundatieduur, de inundatiefrequentie en de grondwaterstand.

Modelresultaten inundatie

Met het inundatiemodel is de inundatie van de uiterwaarden binnen het modelgebied berekend.

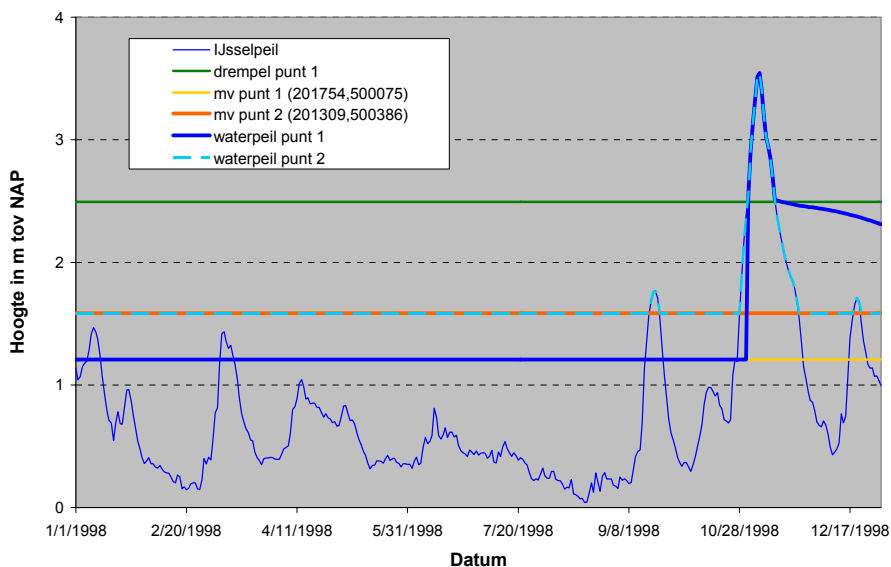
In figuur 10 is de gemiddelde inundatieduur van het maaiveld in de uiterwaard over de periode 1995–2000 weergegeven.



Figuur 10: Gemiddelde inundatieduur in het groeiseizoen (dagen) over de periode 1995–2000.

Om nu nader het proces van maaiveldinundatie te volgen is voor twee punten in de uiterwaard (figuur 10) de inundatie in de loop van de tijd gepresenteerd (figuur 11). Het eerste punt is binnen een maaivelddepressie gekozen. Het tweede punt is buiten een depressie gekozen.

De drempelhoogte van het eerste punt bedraagt 1,98 m +NAP bij een maaiveldhoogte van 1,21 m +NAP. De maaiveldhoogte van het tweede punt bedraagt 1,58 m +NAP.



Figuur 11: Inundatie op twee punten in de uiterwaard; een punt binnen en een punt buiten een maaivelddepressie.

Uit figuur 11 blijkt dat het relatief hoge rivierpeil in september 1998 ter plaatse van punt 1 geen inundatie veroorzaakt. Het rivierpeil blijft onder de drempelhoogte van punt 1. Ter plaatse van punt 2 treedt wel inundatie op.

Pas als het IJsselpiel boven de drempel van punt 1 komt, loopt de maaivelddepressie instantaan vol. Bij een dalend IJsselpiel daalt ook het waterpeil in de uiterwaard. Als het IJsselpiel onder de drempel daalt, daalt het peil ter plaatse van punt 1 als gevolg van infiltratie in de bodem. Indien de periode van hoogwater binnen het groeiseizoen zou hebben plaats gevonden, zou er een versnelde leegloop ten gevolge van de bemaling en uitstroom via de duikers hebben plaats gevonden.

Conclusies

- Ten behoeve van hydrologische effectberekeningen is een inundatiemodel ontwikkeld dat gebruik maakt van het AHN. Dit bleek voor de uiterwaarden nabij Zwolle een adequate wijze om ondermeer de inundatieduur en inundatiefrequentie te berekenen.
- Het inundatiemodel is gekoppeld aan een grondwatermodel omdat de inundatie van de uiterwaarden van invloed is op de ondiepe stijghoogte en vice versa. De toename van de stijghoogte als gevolg van de inundatie van de uiterwaarden bedraagt in periodes met

hoog water circa 0,20 m.

- De modelmatig berekende inundatieduur en inundatiefrequentie zijn gevalideerd door deze uitkomsten te vergelijken met gebiedskennis en het voorkomen van specifieke plantensoorten. Idealiter zijn er meer harde meetgegevens bekend van zowel de inundatieduur als de inundatiefrequentie. Deze gegevens kunnen bijvoorbeeld worden verkregen door tijdens een hoogwaterperiode de geïnundeerde gebieden tweewekelijks te karteren.

Literatuur

- Aggenbach, C.J.S. en T.A.H.M. Pelsma (2005)** Hydro-ecological assessment of vegetation of Dutch river habitats; in: Large Rivers, vol 15, Archiv für Hydrobiologie, Supplement 155/1–4, pag 199–210.
- Grontmij Advies & Techniek (2001)** Grondwatermodellering NS-emplacement Zwolle, beschrijving grondwater- en stoftransportmodellering en uitkomsten saneringsvarianten.
- Sierdsema, H. (1995)** Broedvogels en beheer: Het gebruik van broedvogelgegevens in het beheer van bos- en natuurterreinen; Staatsbosbeheer/SOVON, Driebergen/Beek-Ubbergen.
- Tauw (2006)** Bouw instationair grondwatermodel “Engelse Werk”.