



Walter Immerzeel, FutureWater
 Hasse Goosen, Alterra
 Monique de Groot, Alterra/DHV
 Peter Droogers, FutureWater

Klimaatatlas: ontwikkeling wateroverlastkaarten

De berekende wateroverlast door klimaatverandering hangt af van de gebruikte herhalingstijd, het gebruikte KNMI-scenario en het zichtjaar. Uiteraard is de te verwachte wateroverlast voor 2100 hoger dan voor 2050. Het W-scenario geeft een grotere wateroverlast dan het W+-scenario. Overschrijdingskansen moeten volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water landgebruikspecifiek worden toegepast. Resultaten voor deze studie kunnen daarvoor gebruikt worden. Een harde uitspraak over de hectares waar wateroverlast zal optreden, kan alleen gegeven worden als hierbij vermeld wordt welke drempelwaarde in millimeter gebruikt wordt. Uitgaande van het W-scenario en $T = 25$, is een wateroverlast van meer dan 25 millimeter in 2050 op ongeveer 25.000 hectare te verwachten. Indien het criterium echter op tien millimeter wordt gesteld, dan zou een gebied van ongeveer 320.000 hectare met wateroverlast worden geconfronteerd.

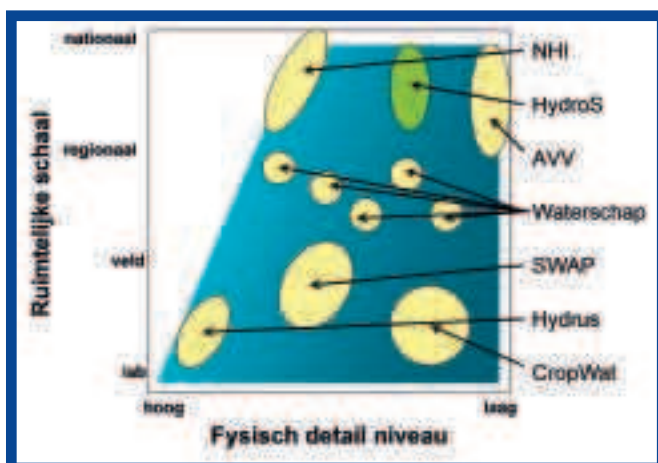
Tussen juni 2008 en juni 2009 liep het project 'Van Schetsboek naar Klimaat-effectatlas'. Het kwam tot stand op initiatief van het Interprovinciaal Overleg (IPO), de programma's Klimaat voor Ruimte, Ruimte voor Geo-informatie, Kennis voor Klimaat en de Waterdienst van het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Het project was een logische voortzetting van de Klimaat-effectschetsboeken¹⁾ die enkele provincies lieten opstellen. Een breed consortium van kennisinstellingen werkte samen met de provincies aan het vergroten van de bruikbaarheid van de informatie uit die schetsboeken binnen plan- en beleids-

processen op (boven)regionaal schaalniveau. Het project resulteerde in de ontwikkeling van een digitale klimaat-effectatlas waarin gebiedspecifiek de effecten van klimaatverandering in beeld worden gebracht (www.klimaat-effectatlas.wur.nl). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen primaire, secundaire en tertiaire effecten van klimaatverandering. De kaarten met primaire effecten geven een landelijk overzicht van de mogelijke veranderingen in klimatologische variabelen als gevolg van klimaatverandering. Deze kaarten vormen de basis voor de kaarten met de secundaire effecten (met name de hydrologische onderleggers),

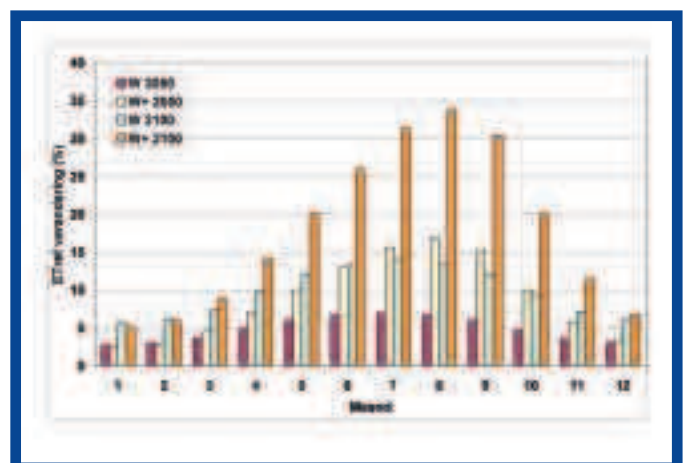
die weer de basis vormen voor effectanalyses (tertiaire effectkaarten) waarmee de gevoeligheid van de functies voor de effecten kan worden bepaald.

De effecten van wateroverlast in het landelijk gebied vormen één van de secundaire effecten die via de atlas raadpleegbaar zijn. Om inzicht te krijgen in de effecten, is een modelbenadering noodzakelijk waarbij in een relatief korte tijd veel scenario's kunnen worden geanalyseerd. Een eerdere analyse van modellen liet zien dat een grote leemte bestaat in landelijke modellen die snel veel scenario's met een acceptabele

Afb. 1: Indeling van modellen met enkele willekeurig gekozen modelnamen



Afb. 2: Verandering in de referentieverdamping bij een verandering van het klimaat.



nauwkeurigheid kunnen doorrekenen²⁾. Op grond van deze conclusie is het model HydroS ontwikkeld met als belangrijkste aandachtspunt het analyseren van droogte. Voor het Klimaatatlasproject is naast droogte vooral een analyse van de te verwachte wateroverlast op landelijke schaal van belang. HydroS is daarom uitgebreid om ook aan deze vraagstelling te kunnen voldoen.

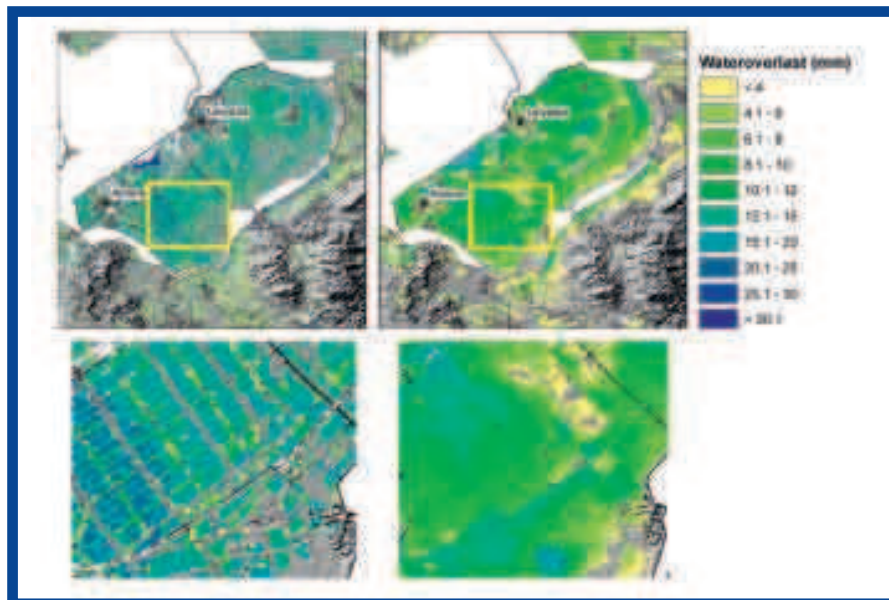
Aanpassing HydroS

HydroS²⁾ is uitgebreid met processen die wateroverlast uitgebreider simuleren. Het oorspronkelijke model berekende de hoeveelheid water die naar het oppervlaktewater stroomt, maar hoe dit water verder wordt afgevoerd werd niet in beschouwing genomen. Met andere woorden, er was behoefte om naast de ontwatering ook de afwatering in het model op te nemen. In de aanpassing van het model is gebruik gemaakt van een aantal concepten zoals gebruikt in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI)³⁾. Aangezien HydroS gericht is op snel kunnen doorrekenen van vele scenario's is een versimpelde routingmethode ontwikkeld.

De afwatering in Nederland kan grofweg worden ingedeeld in poldergebieden, vrij afwaterende gebieden en stedelijk gebied³⁾. Deze driedeling is in HydroS ook gebruikt voor de ontwikkelde afwateringsmodule. Het uitgangspunt voor de afvoer naar het oppervlaktewater vormt de som van drainage en de oppervlakkige afvoer zoals berekend per pixel van 250 x 250 meter van het oorspronkelijke model²⁾.

Voor poldergebieden wordt de afwatering met behulp van de volgende stappen berekend:

- Afvoer vanuit een cel van 250 x 250 meter is drainage (en oppervlakkige afvoer) minus afvoercapaciteit en verandering in waterberging;
- Potentiële waterberging wordt berekend uit het percentage open water en de



Afb. 3: Wateroverlast in de huidige situatie met een herhalingsjijd van $T = 100$ jaar. Links de situatie zonder routing, rechts na toepassing van routing.

- drooglegging per pixel van 250 x 250 meter;
- Actuele waterberging is drainage (en oppervlakkige afvoer) minus afvoercapaciteit;
 - Inundatie vindt plaats indien actuele waterberging groter is dan de potentiële waterberging;
 - De inundatie wordt vervolgens gesommeerd per poldergebied en verdeeld over de laagst gelegen gebieden, gebruikmakend van een digitaal hoogtebestand op 50 x 50 meter.

Voor de vrij afwaterende gebieden geldt:

- Afvoer vanuit een cel van 250 x 250 meter is drainage (en oppervlakkige afvoer) minus afvoercapaciteit;
- Afvoer vanuit cel accumuleert in benedenstroomse cellen via afstroomrichting van het hoogtemodel;

- De inundatie wordt vervolgens gesommeerd per afvoergebied en verdeeld over de laagst gelegen gebieden, gebruikmakend van een digitaal hoogtebestand.

Voor stedelijk gebieden geldt:

- Inundatie van een cel van 250 x 250 meter is drainage (en oppervlakkige afvoer) minus afvoercapaciteit;
- De inundatie wordt vervolgens verdeeld over de laagst gelegen gebieden, gebruikmakend van een digitaal hoogtebestand op 50 x 50 meter.

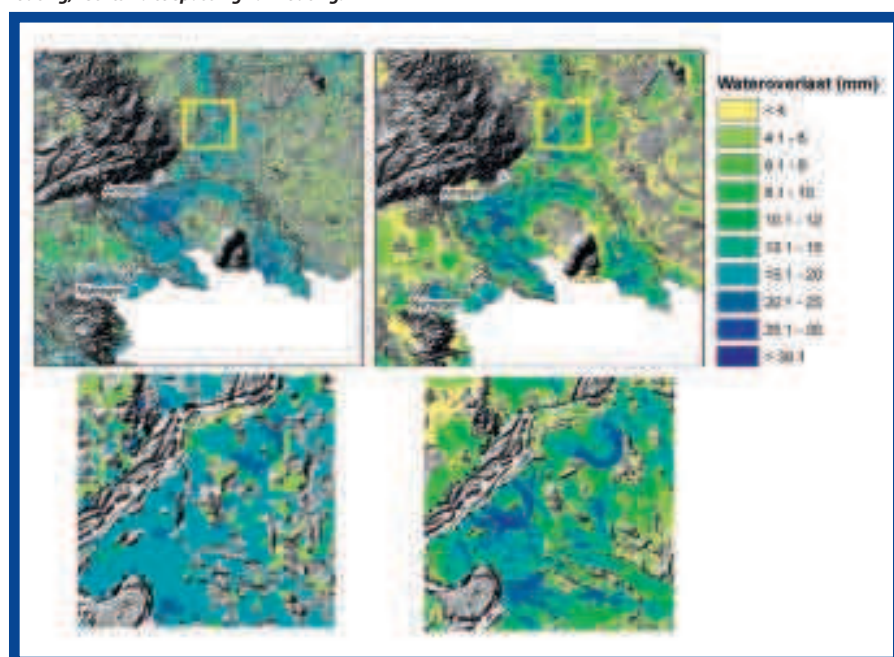
Voor de wateroverlast van deze drie typen gebieden zijn de afvoernormen gebruikt die algemeen gelden voor Nederland (Cultuurtechnisch Vademecum). Voor landelijk gebied houdt dit in: 13 millimeter per dag plus kwel en voor stedelijk gebied 50 millimeter per dag. Voor vrij afwaterende gebieden is voor gebieden met een helling kleiner dan een procent uitgegaan van een afvoercapaciteit van 13 millimeter per dag en voor elke procent toename in helling een toename van de afvoercapaciteit met 10 millimeter per dag. Daarnaast is er ook vanuit gegaan dat de afvoercapaciteit van de bovenstroomse gebieden invloed heeft op de afvoercapaciteit van benedenstroomse gebieden door de aanwezigheid van openwaterafvoer.

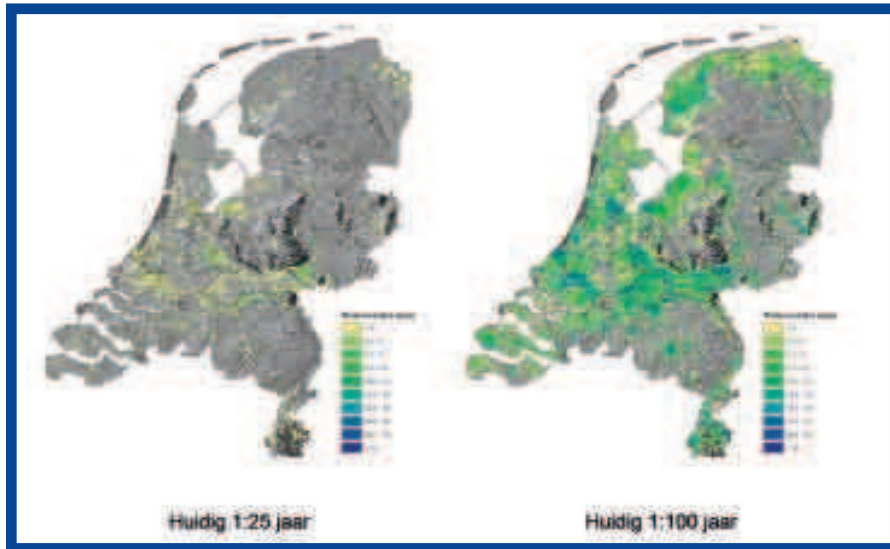
Het gehele concept is robuust, rekt uitermate snel (heel Nederland voor één jaar doorrekenen kost minder dan tien minuten) en is uitermate flexibel. Indien bijvoorbeeld nauwkeurigere afvoercapaciteiten voor stedelijk gebied aanwezig zijn, kan dit direct worden aangepast. Ook effecten van veranderingen in peilen, afvoernormen en/of landgebruik kunnen relatief snel worden doorberekend. Het geheel is in de PCRaster-omgeving ingebouwd. Bovendien zijn de processen relatief simpel uit te leggen.

Klimaatscenario's

Het doel van de studie was om een inschatting te krijgen van de te verwachte

Afb. 4: Wateroverlast in de huidige situatie met een herhalingsjijd van $T = 100$ jaar. Links de situatie zonder routing, rechts na toepassing van routing.





Afb. 5: Wateroverlast in de huidige situatie met een herhalingsstijd van T = 25 en T = 100 jaar.

Herhalingsstijden van dagelijkse neerslag in millimeter.

Herhalingsstijd (1/j)	huidig	W		W+	
		2050	2100	2050	2100
10	54	66	78	60	66
25	61	75	89	68	74
100	79	98	117	88	97

ruimtelijke wateroverlast onder de verschillende klimaatscenario's. Uitgaande van de door het KNMI geactualiseerde KNMI'06-scenario's is gekozen voor het W- en het W+-scenario met als zichtjaren 2050 en 2100. Samen met de huidige situatie levert dit vijf combinaties op. Het is bekend dat voor een juiste inschatting van de invloed van klimaatverandering geen gebruik gemaakt kan worden van enkele korte buien, gezien de grote buffercapaciteit van open water en vooral de bodem. Daarom is gebruik gemaakt van een gemiddeld jaar (1983) en met behulp van de zogeheten KNMI *climate explorer* zijn de te verwachte neerslaghoeveelheden in 2050 en 2010 voor het W- en W+-scenario bepaald. Om de exacte overschrijdingskansen van neerslag te krijgen, zou een zeer langdurige reeks van bijvoorbeeld 100 of 1.000 jaar moeten worden doorgerekend. In deze studie is gekozen voor een versimpelde aanpak, waarbij de natste dag van het jaar is vervangen door de neerslag uit de extremen-analyse, zoals weergegeven in de tabel.

Wateroverlast in het landelijk gebied hangt voor een groot gedeelte samen met de bergingscapaciteit van het open water en vooral de bodem. Voordat een hevige bui plaatsvindt, moeten de bodemvochtcondities daarom adequaat gemodelleerd worden. Om die reden is in de analyse de verandering in verdamping integraal meegenomen. In afbeelding 2 is de te verwachten verandering in referentieverdamping te zien. Deze is in HydroS vertaald naar potentiële verdamping met behulp van gewasfactoren. Vervolgens is de actuele

verdamping berekend, rekening houdend met eventueel vochttekort in de bodem.

Resultaten

HydroS is toegepast op de huidige situatie en op klimaatscenario's voor de toekomst. In afbeelding 3 (rechts) is een voorbeeld te zien van de ruimtelijke spreiding van de te verwachte wateroverlast in de huidige situatie met een herhalingsstijd van T = 100 jaar. De afbeelding laat tevens zien hoe de *routing* in deze nieuwe versie van HydroS is uitgewerkt. De linkerkant van afbeelding 3 laat zien waar problemen zich voordoen doordat de ontwateringscapaciteit niet voldoende is. Het overtollige water stroomt door het stelsel van waterlopen naar het

afwateringspunt. Als ook de afwateringscapaciteit niet voldoende is, ontstaat wateroverlast in de laagst gelegen gebieden.

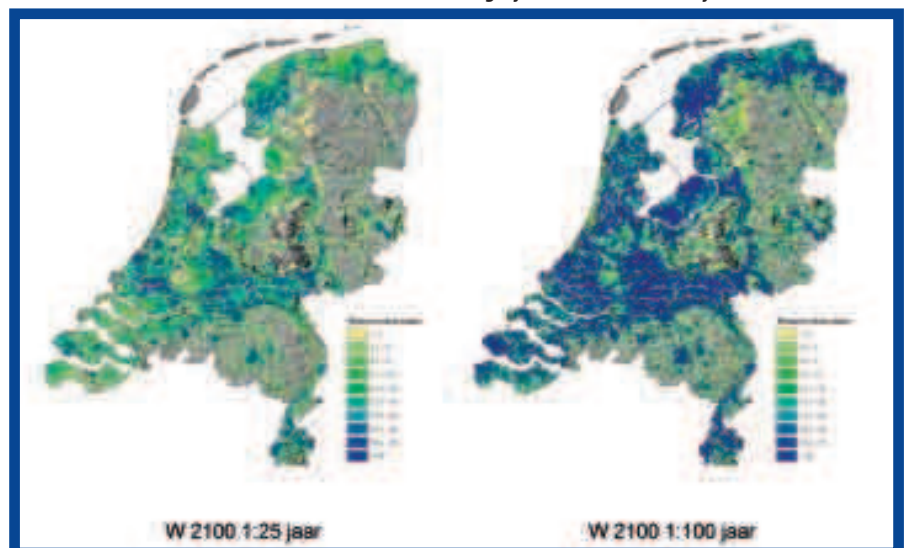
Een ander voorbeeld dat de werking van HydroS demonstreert in hellend gebied is te zien in afbeelding 4. De ontwateringscapaciteit is niet voldoende om de neerslaghoeveelheid van een bui van 79 mm, behorend bij een herhalingsstijd van T = 100 jaar, te verwerken (linkerfiguur). Het uiteindelijke resultaat van HydroS laat zien dat de wateroverlast zich concentreert in de lagere gebieden en dat de afwateringscapaciteit niet voldoende is.

Voor het hele land is de T = 25 en T = 100 jaar wateroverlast voor de huidige situatie, zoals berekend met HydroS, te zien in afbeelding 5. Het is duidelijk dat het verschil tussen deze twee herhalingsstijden aanzienlijk is. Voor T = 25 jaar is de wateroverlast vooral beperkt tot het westen en midden van het land tot maximaal vijf millimeter. Volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water Actueel geldt voor weiland een norm van T = 10 jaar en voor akkerland T = 25 jaar. Volgens deze resultaten wordt hieraan voldaan. De kaart voor T = 100 jaar laat zien dat aanzienlijke wateroverlast valt te verwachten in vooral laag Nederland, maar ook in Zuid-Limburg en enkele gebieden rondom de Veluwe.

Voor twee scenario's (W en W+), twee herhalingsstijden (25 en 100 jaar) en twee zichtjaren (2050 en 2100) is vervolgens de te verwachten wateroverlast doorgerekend, wederom voor een heel jaar en de maximale wateroverlast die in dat jaar optreedt. De meest extreme situatie ontstaat bij het W-scenario in het jaar 2100. De resultaten hiervoor met de twee herhalingsstijden zijn te zien in afbeelding 6. Het is duidelijk dat aanzienlijke wateroverlast valt te verwachten; bij een herhalingsstijd van T = 100 jaar zullen grote gebieden in Nederland meer dan 30 millimeter water te verwerken krijgen.

Afbeelding 7 laat voor alle scenario's de te verwachten wateroverlast zien in klassen van meer dan 5, meer dan 25 en meer dan 50 millimeter bij de twee gekozen herhalings-

Afb. 6: Te verwachte wateroverlast in 2100 met een herhalingsstijd van T = 25 en T = 100 jaar.



tijden ($T = 25$ jaar en $T = 100$ jaar). Het eerste dat opvalt is dat de berekende wateroverlast in de huidige situatie met een $T = 25$ relatief klein is en dus aangeeft dat het huidige watersysteem goed gedimensioneerd is. Bij $T = 100$ is echter aanzienlijke wateroverlast te verwachten.

Bij een inventarisatie uitgevoerd onder alle waterschappen bleek dat ongeveer 88.000 hectare niet aan de NBW-normering voldoet. Dit resultaat is niet direct te vertalen naar de waarden die in deze studie zijn gevonden. Ten eerste zijn bij de NBW-toetsing de meeste waterschappen uitgegaan van het middenscenario, wat ongeveer gelijk is aan het KNMI'06-G-scenario. Ten tweede geldt volgens het NBW alleen wateroverlast ten gevolge van inundatie vanuit het oppervlaktewater, terwijl deze studie uitgaat van alle wateroverlast. Daarnaast heeft elk waterschap een eigen methode gebruikt, terwijl hier voor een universele methode is gekozen. Op grond van de gevonden resultaten kan ook nog eens aangegeven worden wat de wateroverlast in absolute hoeveelheden is. Indien wordt uitgegaan van $T = 25$ en een waterdiepte van meer dan tien millimeter, komt dit het dichtst bij de uitgangspunten van het NBW. Het te verwachte areaal met wateroverlast bedraagt dan ongeveer 320.000 hectare. Uitgaande van een waterdiepte van meer dan 15 millimeter, bedraagt dit ongeveer 140.000 hectare. Het is duidelijk dat een wateroverlastcriterium eigenlijk niet kan worden vastgesteld zonder een indicatie van de mate van wateroverlast te definiëren.

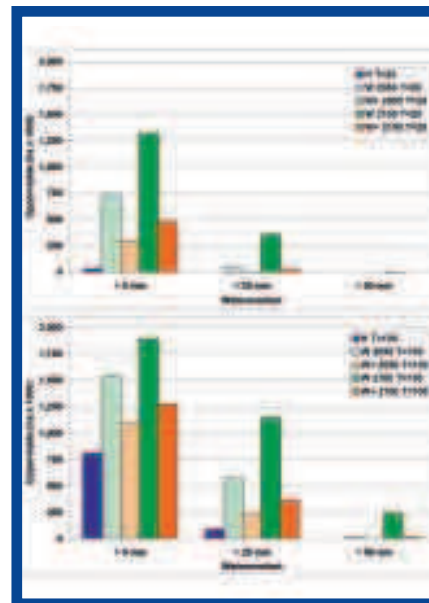
Op basis van te verwachte wateroverlast kan vervolgens worden bepaald in welke mate de functies in een gebied hiervoor kwetsbaar zijn. Hiervoor is in het kader van de Klimaat-effectatlas een instrument ontwikkeld dat de mogelijk ruimtelijke consequenties van de effecten van klimaatverandering op het

niveau van de provincie in beeld brengt. Naar het voorbeeld van de ruimtelijke klimaat-analyse van de Provincie Zuid-Holland is een klimaatscan ontwikkeld met als doel de klimaatbestendigheid van de keuzes in ruimtelijke planvorming te agenderen en onderbouwen. Klimaatverandering is een relatief nieuw vraagstuk. Hoewel er veel generieke kennis bestaat over hoe het klimaat zal veranderen, is nog steeds sprake van grote onzekerheden. Een deel van deze onzekerheden is inherent aan het vraagstuk van klimaatverandering. Met behulp van de 'klimaatscan' is getracht om, op basis van een multicriteria-analyse en gebruikmakend van beschikbare wetenschappelijke gegevens en kennis van deskundigen op dit gebied, gebiedsspecifiek een eerste indicatie te geven van de mate van robuustheid van functies. De kracht van deze pragmatische methode is dat met betrekkelijk weinig inspanning kwetsbaarheden in het landgebruik inzichtelijk worden gemaakt. Dit levert een onderbouwing van keuzes in het ruimtelijke ontwerpproces.

De scan combineert de mate waarin het effect in een gebied optreedt met de mate waarin een functie gevoelig is voor dit effect. Om de mate waarin wateroverlast optreedt inzichtelijk te maken, gelden in de klimaatscan de maximale inundatiediepte en de herhalingsstijd waarbij wateroverlast optreedt als maatgevende effectindicatoren (kans op inundatie). De kaarten van de verschillende herhalingsstijden zijn daartoe in een kaartbeeld geïntegreerd. Een voorbeeld van een dergelijke klimaatrobustheidskaart is gegeven in afbeelding 8.

Conclusies

De gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op het model HydroS met tot nu toe beperkte validatie en kalibratie. Er is voor een groot gedeelte uitgegaan van data die op landelijke schaal beschikbaar is, vooral na de introductie van het Nationaal Hydrolo-



Afb. 7: Oppervlakte met te verwachte wateroverlast met een herhalingsstijd van $T = 25$ (boven) en $T = 100$ jaar.

H = huidig; W en W+ zijn de KNMI'06-scenario's.

gisch Instrumentarium. Het gehele model is nu beschikbaar voor verdere toepassingen, waarbij aanvullende gegevens en scenario's kunnen worden doorgerekend. Er is in deze studie bewust gekozen voor de KNMI'06-W- en -W+-scenario's, omdat deze volgens de laatste KNMI-analyses steeds waarschijnlijker lijken. Uiteraard kan HydroS ook gebruikt worden om andere scenario's (G en G+) te analyseren.

In het verleden zijn landelijke wateroverlastkaarten vaak gegenereerd door resultaten van individuele waterschappen samen te voegen. Bij deze analyses is de lokale specifieke kennis uiteraard meegenomen, maar gezien de diversiteit van analysetechnieken en uitgangspunten ontstonden vaak kunstmatige verschillen tussen gebieden. De grote winst van de huidige analyse met HydroS is de universele aanpak.

LITERATUUR

- 1) Stuyt C., A. Idenburg, J. Bessembinder, A. Verbout, P. Bakel, C. Hermans, M. Paulissen, S. van Rooij, E. Steingröver, G. Blom-Zandstra en C. Vos (2008). Klimaat-effectschetsboeken provincies Noord-Holland, Zuid-Holland, Utrecht, Gelderland, Drenthe en Groningen, Zeeland en Noord-Brabant. Alterra, DHV en KNMI.
- 2) Droogers P. en W. Immerzeel (2010). Wat is het beste model H_2O nr. 4, pag. 38-41.
- 3) Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (2008). Modelrapportage.
- 4) Schuurmans H., H. Niewold, G. van den Eertwegh en P. Droogers (2010). NBW-actueel: methode-ontwikkeling voor wateropgaven met een bandbreedte. H_2O nr. 1, pag. 37-39.
- 5) Buishand T., R. Jilderda en J. Wijngaard (2009). Regionale verschillen in extreme neerslag. KNMI. Scientific report WR 2009-01.
- 6) Kragt F., F. van Gaalen, P. Cleij en W. Ligtoet (2006). Audit Waterbeleid 21e eeuw. Analyse van de opgaven wateroverlast volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water. Milieu- en Natuurbureau. Rapport 555060002/2006.

Afb. 8: Robuustheidskaart zoals die gebruikt wordt in de klimaat-effectatlas. De kaart combineert de effectkaart (zoals gegenereerd met HydroS voor een 1/25 bui in het 2050 W-scenario) met een kaart met gevoeligheden van landgebruiksfuncties (op basis van de LGN5). Vervolgens zijn de uitkomsten in vijf klassen verdeeld.

