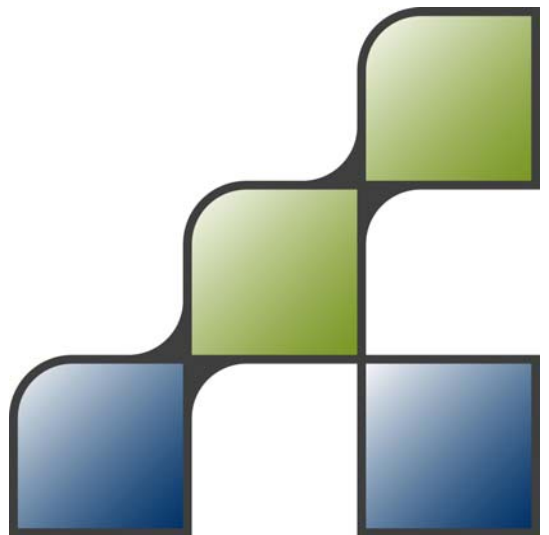


Klimaatverandering en lokale wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag in Nederland



Klimaatverandering en lokale wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag in Nederland

Februari 2008

Financieel ondersteund door
BSIK Klimaat voor Ruimte programma
Aandacht voor Veiligheid

Auteurs
W.W. Immerzeel
P. Droogers

FutureWater Report No. 73

FutureWater
Costerweg 1G
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag en veranderend landgebruik zal in de toekomst steeds vaker optreden. Maatregelen om wateroverlast te voorkomen moeten onderscheid maken tussen vier verschillende processen:

- Toename van de gemiddelde winter drainage uit poldersystemen (Kwadijk, 2007). De oplossing moet gezocht worden in een vergroting van de gemaalcapaciteit.
- Wateroverlast ten gevolge van inundatie uit het regionale oppervlakte watersysteem (NBW). Oplossing moet gezocht worden in de trits vasthouden-bergen-afvoeren.
- Lokale wateroverlast ten gevolge van toenemende extreme neerslag en veranderend landgebruik en een gelimiteerde ontwateringscapaciteit. De oplossing moet gezocht worden in het realiseren van lokale bergingscapaciteit.

Deze studie heeft zich op het laatste punt gericht. Vooral lokale wateroverlast ten gevolge van een te kleine capaciteit van het ontwateringssysteem zal op dagbasis voor overlast gaan zorgen. Dit rapport beschrijft een studie die deze overlast voor heel Nederland kwantificeert. Als eerste is op basis van de hoogteligging, helling, kwel en grondwaterstand de bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast in kaart gebracht. Aan de hand van landgebruiknormen zoals vastgelegd in het National Bestuursakkoord Water, toekomstige veranderingen in ruimtegebruik en extreme neerslag is deze bio-fysische gevoeligheid vertaald naar een wateroverlast. De wateroverlast voor extreme neerslag volgens het W scenario en landgebruikverandering volgens het MNP Trendscenario wordt geschat op 60.6 miljoen m³. Dit is een toename van 317% ten opzichte van de huidige situatie. De gevonden hoeveelheden beslaan 15% - 25% van de wateropgave die bepaald is in het kader van het Nationaal Bestuursakkoord Water. Deze hoeveelheid moet extra geborgen worden. Er zijn grote ruimtelijke verschillen en de provincies Friesland, Groningen, Zuid-Holland en Noord-Holland hebben de grootste wateroverlast. De methodiek is zeer geschikt gebleken om met groot ruimtelijk detail de wateroverlast te kwantificeren met een aanpak die voor heel Nederland gelijk is.



Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding	7
2 Afbakening	9
3 Klimaatverandering in Nederland	11
4 Methodiek	15
4.1 Introductie	15
4.2 Bio-fysische gevoeligheid	15
4.2.1 Hoogte en helling	16
4.2.2 Kwel en wegzijging	18
4.2.3 Grondwaterstanden	20
4.2.4 Bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast	21
4.3 Extreme neerslag	22
4.4 Wateroverlast	24
5 Resultaten	27
6 Conclusies en aanbevelingen	34
7 Literatuur	37





1 Inleiding

Niemand lijkt meer te twijfelen aan het feit dat ons klimaat aan het veranderen is en dat dit grote gevolgen zal hebben voor de ruimtelijke inrichting van Nederland. De wereldtournee van Al Gore met zijn *Inconvenient Truth* en de publicatie van de *Stern review* door Sir Nicholas Stern hebben klimaatverandering wereldwijd hoog op de politieke agenda geplaatst.

Uit de in 2006 door het KNMI gepubliceerde klimaatscenario's (Van den Hurk *et al.*, 2006) blijkt dat het ook in Nederland waarschijnlijk is dat de temperatuur verder zal stijgen, dat er langere perioden van extreme droogten zullen optreden, en dat de kans op extreem veel neerslag in een korte periode sterk zal toenemen. Dit zal grote effecten hebben op het waterbeheer en de ruimtelijke ordening in Nederland. Het steeds intensiever wordende (multi-functionele) landgebruik moet daarom zo robuust en flexibel mogelijk worden gepland om aan deze toenemende klimaatdruk weerstand te kunnen bieden.

Eind 2000 constateerde de Commissie Waterbeheer 21e Eeuw dat een teveel aan water problemen kan geven voor het Nederlandse waterbeheer. De commissie WB21 constateerde tevens dat Nederland zich moet voorbereiden op perioden van toenemende watertekorten. Drie jaar later worden de resultaten van commissie WB21 samen met de kaderrichtlijn water vastgelegd in het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). De uitwerking van het NBW wordt ondersteund door een aantal landelijke studies naar droogte (RIZA, 2003) en wateroverlast. Op landelijke schaal is er een toetsing uitgevoerd naar in hoeverre regionale watersystemen voldoen aan werknormen zoals gedefinieerd in het NBW. Hierbij wordt landgebruik gekoppeld aan wateroverlast.

Er is geen eenduidige methodiek beschikbaar om de kans op schade door wateroverlast in de toekomst met relatief groot detail op landelijke schaal in kaart te brengen. Bij verschillende sectoren (ruimtelijke ordening, landbouw, natuur) is er een grote behoefte aan deze ruimtelijke informatie die een belangrijke input kan zijn voor strategische planologische beslissingen.

In dit rapport wordt een methodiek gepresenteerd die deze problematiek landelijk in kaart brengt op basis van geografische informatie. In hoofdstuk 2 wordt in het kort beschreven wat de te verwachte klimaatverandering in Nederland zal zijn. In hoofdstuk 3 wordt de methodiek toegelicht en de resultaten worden in hoofdstuk 4 gepresenteerd.





2 Afbakening

Wateroverlast ten gevolge van klimaatverandering is een ruim begrip. Ten eerste moet er onderscheid gemaakt worden tussen het effect van zeespiegelstijging en het effect van veranderende neerslag. Ten gevolge van zeespiegel stijging zullen grote delen die nu onder vrij verval water kunnen afvoeren in de toekomst bemalen moeten worden, wat aanzienlijk kosten met zich mee brengt. Ten tweede heeft een verandering van de neerslag karakteristieken een aantal verschillende effecten met verschillende mogelijke oplossingen:

- Toename van de **(extreme) afvoeren in de grote rivieren** als gevolg van een toename van neerslag in de stroomgebieden van de Rijn en de Maas. Oplossingen moet gezocht worden in een aanpak zoals "Ruimte voor de Rivier"
- **Toename van de gemiddelde winter drainage** uit poldersystemen (Kwadijk, 2007). De oplossing moet gezocht worden in een vergroting van de gemaalcapaciteit.
- Wateroverlast ten gevolge van **inundatie uit het regionale oppervlakte watersysteem** (NBW). Oplossing moet gezocht worden in de trits vasthouden-bergen-afvoeren.
- Lokale wateroverlast ten gevolge van toenemende extreme neerslag en veranderend landgebruik en een **gelimiteerde ontwateringscapaciteit**. De oplossing moet gezocht worden in het realiseren van lokale bergingscapaciteit.

De in dit rapport gepresenteerde resultaten hebben alleen betrekking op het laatste punt. Deze studie richt zich op de wateroverlast ten gevolge van een onvoldoende ontwateringscapaciteit na een extreme neerslag binnen een periode van 24 uur. De resultaten kunnen gebruikt worden als leidraad voor het vaststellen van lokale bergingsbehoeften, maar kunnen dus niet worden aangewend om uitspraken te doen over benodigde gemaalcapaciteiten van hoofd afwateringsystemen op tijdschalen langer dan één dag. Deze studie kwantificeert dus de effecten van klimaatverandering (KNMI'06 W-scenario) en landgebruikverandering (MNP Trendscenario 2040) op wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag die in 1 dag kan vallen. De aanvullende bergingscapaciteit die berekend wordt, is de hoeveelheid water die extra geborgen moet worden op één dag met extreme neerslag in het lokale systeem. Dit is dus een ander uitgangspunt dan bijvoorbeeld de studie van Kwadijk (2007), waarin gekeken wordt naar het maandelijkse neerslagoverschot in de winter (december – februari) om per dijkkring een gemiddelde en maximale hoeveelheid te bepalen dat afgevoerd dient te worden in de huidige en toekomstige situatie.





3 Klimaatverandering in Nederland

De hoge rivierstanden in 1993 en 1995 en de wateroverlast door extreme neerslag in 1998 hebben geleid tot het instellen van de Commissie Waterbeheer 21e Eeuw (WB21). Het rapport van deze commissie en de wettelijke verankering hiervan in het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) geven richtlijnen betreffende de te verwachte klimaatveranderingen. Deze richtlijnen, soms toekomstbeelden genoemd, geven in een aantal scenario's weer wat het te verwachten klimaat in 2050 en 2100 is (Kors et al., 2000). Het tweede "Assessment Report" van het IPCC uit 1995 vormde de basis voor de WB21 scenario's. Het KNMI heeft deze scenario's vertaald naar drie mogelijke scenario's (laag, centraal en hoog) voor 2050 en 2100. Uitgangspunt was de temperatuurprojecties van een zevental General Circulation Models (GCMs) en de relatie tussen temperatuur en neerslag in Nederland. Een overzicht van deze scenario's is te zien in Tabel 1.

Tabel 1. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050.

	WB21			KNMI'06			
	Laag	Centraal	Hoog	G	G+	W	W+
Zomer (juni, juli, augustus)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.4	+1.7	+2.8
warmste zomerdag (°C)				+1.0	+1.9	+2.1	+3.8
gemiddelde neerslag (%)	+0.5	+1	+2	+3	-10	+6	-19
aantal natte dagen (%)				-2	-10	-3	-19
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+13	+5	+27	+10
referentieverdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35
Winter (december, januari, februari)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.1	+1.8	+2.3
koudste winterdag (°C)				+1.0	+1.5	+2.1	+2.9
gemiddelde neerslag (%)	+3	+6	+12	+4	+7	+7	+14
aantal natte dagen (%)				0	+1	0	+2
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+4	+6	+8	+12
referentieverdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35

In het Nationaal Bestuursakkoord Water is afgesproken dat eind 2005 het watersysteem getoetst moet zijn voor wateroverlast uitgaande van minimaal het WB21 Centrale scenario. Deze toetsing is door de meeste waterbeheerders inmiddels uitgevoerd. Veranderend inzicht in klimaatprocessen hebben de WB21 scenario's echter achterhaald en zijn vervangen door de nieuwe KNMI'06 scenario's. Het is voorsnog onduidelijk in hoeverre waterbeheerders deze nieuwe scenario's zullen gaan gebruiken.



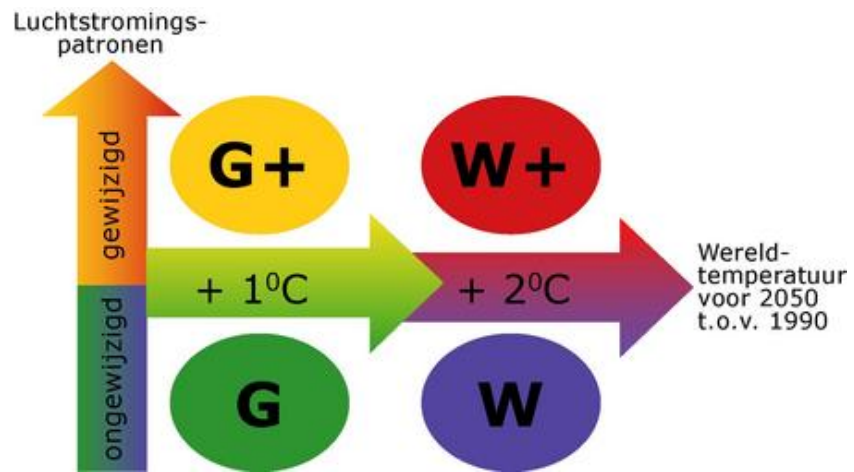
De nieuwe KNMI'06 scenario's zijn op 30 mei 2006 door Staatssecretaris Schultz van Haegen gepresenteerd. De nieuwe scenario's zijn een update van de vorige generatie die ten behoeve van de commissie Waterbeheer 21e Eeuw (WB21) waren opgesteld. Net als de WB21 klimaatscenario's worden er in de nieuwe scenario's (kortweg aangeduid als de KNMI'06 klimaatscenario's) getallen gegeven voor de verandering van neerslag, temperatuur, potentiële verdamping, wind en zeeniveau. Ook worden naast seizoensgemiddelde waarden ook veranderingen in een aantal extreme grootheden gekwantificeerd, zoals de temperatuur op de warmste of koudste dag van het jaar, of de verandering van de 10-daagse neerslagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden.

Een aantal grootheden is op een andere manier gedefinieerd dan in de WB21 scenario's (zoals de vervanging van bijvoorbeeld "intensiteit van zomerse buien" door "dagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden") en er zijn nieuwe grootheden bijgekomen (zoals het aantal dagen met neerslag). De keuze van de variabelen is echter niet wat het meest in het oog springt bij de KNMI'06 klimaatscenario's. De indeling van drie naar vier scenario's en de definitie van deze scenario's is aanzienlijk gewijzigd.

In de WB21 scenario's werd gesproken van een "laag", "midden" en "hoog" scenario, later nog aangevuld met een "hoog droog" scenario ten behoeve van de Droogtestudie. De nieuwe KNMI'06 klimaatscenario's bevatten nu vier scenario's (Figuur 1). Deze vier zijn gebaseerd op analyse van GCM resultaten die aangaven dat de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur rond 2050 hoogst waarschijnlijk ergens tussen de +1°C en +2°C uitkomt. Deze temperatuurstijgingen vormen het uitgangspunt voor de Gematigde (G) en Warme (W) klimaatscenario's. Echter, voor het klimaat in Nederland is niet alleen de wereldgemiddelde temperatuur van belang: ook de gemiddelde windrichting speelt een cruciale rol. Winters met een sterke westelijke stroming zijn in de regel een stuk milder en natter dan wanneer de stroming minder sterk westelijk is. En een deel van de bestudeerde klimaatmodellen laat zien dat de statistiek van de westelijke stromingen behoorlijk kan veranderen wanneer de wereldgemiddelde temperatuur stijgt. Sommige modellen laten in de winter een sterkere westelijke stroming zien, terwijl in de zomer juist meer dagen voorkomen met een oostelijke windrichting. Dit gaat gepaard met een grotere kans op warm en droog weer. De veranderingen in stromingspatronen zijn echter het gevolg van een serie complexe processen en daarom wijken verschillende modellen ook sterk van elkaar af. De klimaatscenario's nemen deze onzekere veranderingen mee. Naast de twee scenario's zonder verandering in luchtstroming zijn er nu twee scenario's, waarin de verandering in luchtstroming wel is meegenomen: de G+ en W+ scenario's.

Voor meer achtergronden over de KNMI scenario's wordt verwezen naar Van den Hurk *et al.* (2006).





Figuur 1. Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's. G en G+ hebben een Gematigde opwarming van +1°C in 2050 t.o.v. 1990, terwijl W en W+ uitgaan van een Warmer klimaat (+2°C). De "+" geeft aan dat in de scenario's rekening wordt gehouden met een sterke verandering van de gemiddelde luchtstromingen.



4.1 Introductie

In deze studie wordt een methodiek toegepast die gebaseerd is op ruimtelijke gegevens voor geheel Nederland. Aan de hand van ruimtelijke en statistische analyses wordt bepaald wat de bergingsbehoefte is in de huidige situatie en in de toekomstige situatie volgens het W scenario. Voor zowel de huidige als de toekomstige situatie zijn hierbij de volgende stappen genomen:

- Bepalen van de bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast als functie van hoogte, helling, kwel en grondwatertrap.
- Bepalen van een ruimtelijk beeld van extreme neerslag bij verschillende herhalingstijden.
- Bepalen van de herhalingstijden van wateroverlast.
- Kwantificering wateroverlast.

Deze stappen zijn hieronder in detail verder beschreven.

4.2 Bio-fysische gevoeligheid

De onderliggende gedachte van de methodiek is dat wateroverlast in lokale systemen afhankelijk is van (i) de hoogteligging van een gebied ten opzichte van de omgeving, (ii) de helling, (iii) kwelprocessen en (iv) de grondwaterstand.

Voor elk van deze variabelen zijn beslissingstabellen gemaakt waarmee is vast te stellen of bepaalde gebieden gevoelig zijn voor wateroverlast. De basis voor de beslistabellen is het schalen van de gegevens naar waarden tussen 0 en 1, waarbij 0 geldt als “niet gevoelig” en 1 als “zeer gevoelig”. Deze waarden kunnen gezien worden als deelcomponenten van de klimaatgevoeligheid.

Voor pixels van 100 bij 100 meter is de gevoeligheid bepaald door voor elke variabele (hoogte, helling, kwel en grondwaterstand) een lineaire interpolatie uit te voeren met een boven- en ondergrens voor minimale gevoeligheid en maximale gevoeligheid. De gevoeligheid wordt gegeven door:

$$\text{Gevoeligheid} = (\text{Waarde} - \text{MinimaleWaarde}) / (\text{MaximaleWaarde} - \text{MinimaleWaarde})$$

De uiteindelijke bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast is bepaald door het produkt te nemen van de gevoeligheden van de afzonderlijke variabelen. Vervolgens zijn de dagsommen van de neerslag voor de 13 meteorologische hoofdstations geanalyseerd. Voor elk station is de dagelijkse neerslaghoeveelheid bepaald die hoort bij 1:5, 1: 10, 1:25: 1:50 en 1:100 jaar



herhalingstijd voor de huidige situatie en voor het W scenario in 2050. Dit is gedaan door gemeten waarden te fitten van een Generalized Extreme Value (GEV) verdeling. Deze hoeveelheden zijn ruimtelijk geïnterpoleerd en gecombineerd met de bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast. Dit wordt in detail beschreven in onderstaande sectie.

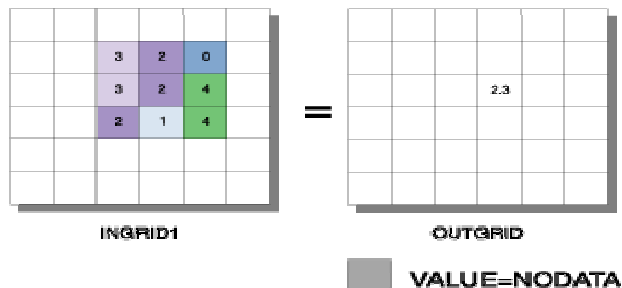
4.2.1 Hoogte en helling

De hoogteligging van een gebied speelt een belangrijke rol in de gevoeligheid voor lokale wateroverlast. Voor elke pixel is gekeken naar de helling en naar de hoogte ten opzicht van de omgeving. Als een gebied relatief vlak is en daarnaast laag ligt ten opzicht van de omgeving dan is het gebied relatief gevoelig voor wateroverlast. Uitgangspunt is het Actueel Hoogte Bestand Nederland (AHN, 2005) met een resolutie van 25 meter. Er worden verschillende voorbewerkingen uitgevoerd op het hoogtebestand:

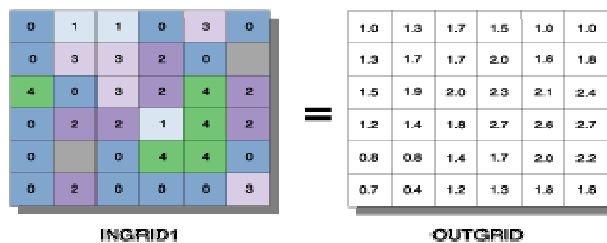
- Het hoogte bestand wordt “geresampled” naar een ruimtelijke resolutie van 100 meter.
- De gebieden waarvoor geen gegevens beschikbaar zijn worden opgevuld door de hoogte te interpoleren met gegevens van omliggende cellen.

Vervolgens wordt een omgevingshoogte raster berekend. Dit wordt gedaan met een zogenaamde “focalmean” functie. De “focalmean” functie bepaalt vanuit een specifieke grid cel het gemiddelde van een aantal cellen rond deze specifieke cel en kent de waarde daaraan toe. Dit wordt gedaan voor elke cel uit het raster. Figuur 2 laat de werking van deze functie zien. Aan de linkerkzijde staat het input raster en aan de rechterzijde het resultaat. In dit voorbeeld wordt steeds het gemiddelde van 3 bij 3 cellen bepaald.

The Neighborhood Function on an Individual Neighborhood



The Neighborhood Function on a Grid

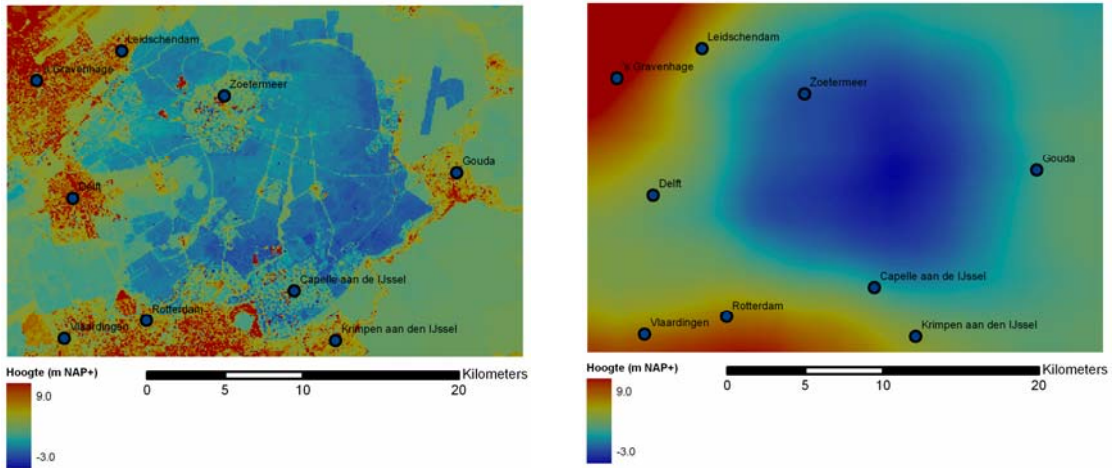


Expression: FOCALMEAN(INGRID1, RECTANGLE, 3, 3)

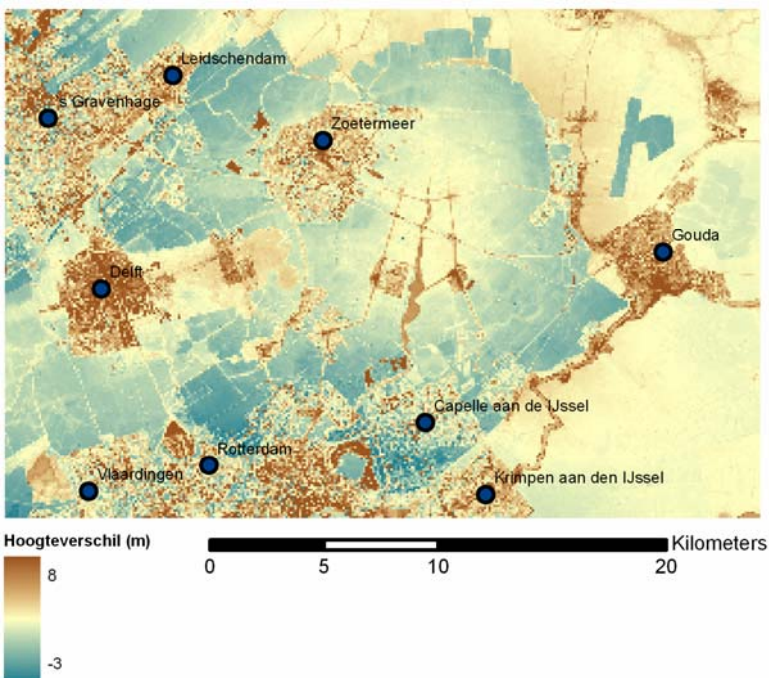
Figuur 2: De "focalmean" functie ter bepaling van de omgevingshoogte



Voor deze toepassing is de grootte van het venster waarbinnen gemiddeld wordt gesteld op 100 bij 100 cellen. Dit betekent dus dat er gekeken wordt naar een gebied van 10 km rond een cel. Van het resultaat van de “focalmean” functie wordt vervolgens het originele raster afgetrokken en dit resulteert in raster waarvan de waarden de relatieve hoogte ten opzicht van de omgeving weergeven.



Figuur 3: Het hoogtemodel met een resolutie van 100 meter (links) en het omgevingshoogte raster (rechts) voor de Zuidplaspolder



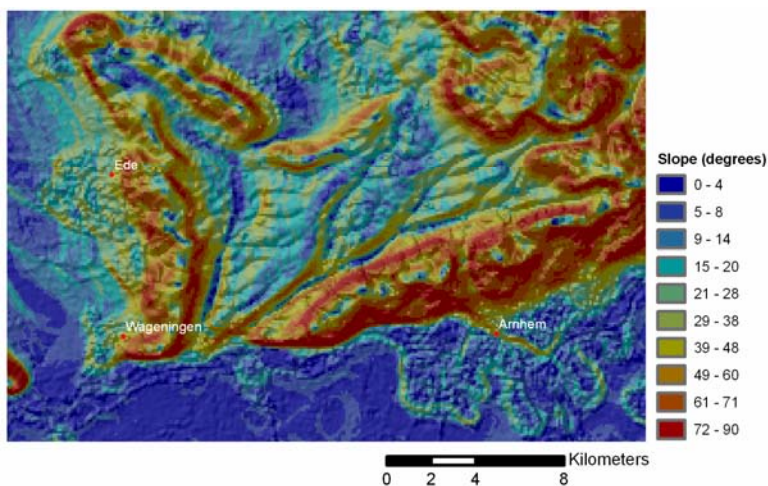
Figuur 4: Hoogte ten opzichte van de omgeving voor de Zuidplaspolder

In Figuur 3 wordt het gecorrigeerde hoogtemodel weergegeven en het omgevingshoogte raster voor de Zuidplaspolder in Zuid-Holland. In Figuur 4 is het uiteindelijke resultaat weergegeven. De buitenbegrenzing van de droogmakerij is duidelijk zichtbaar en ook binnen de polder is er een relatief grote variatie waar te nemen. Het bebouwde gebied springt eruit en ook de



afwateringsstructuren zijn goed te zien. Door gebruik te maken van de relatieve hoogte van een bepaald punt ten opzichte van de omgeving zijn gebieden in het laaggelegen westen van Nederland met het hoger gelegen oostelijk deel van Nederland te vergelijken.

Een tweede component die meegenomen wordt is de helling van het gebied. In Figuur 5 is de helling afgeleid van het gecorrigeerde hoogtemodel weergegeven ter hoogte van Wageningen en Arnhem. De Veluwe zijn duidelijk zichtbaar.



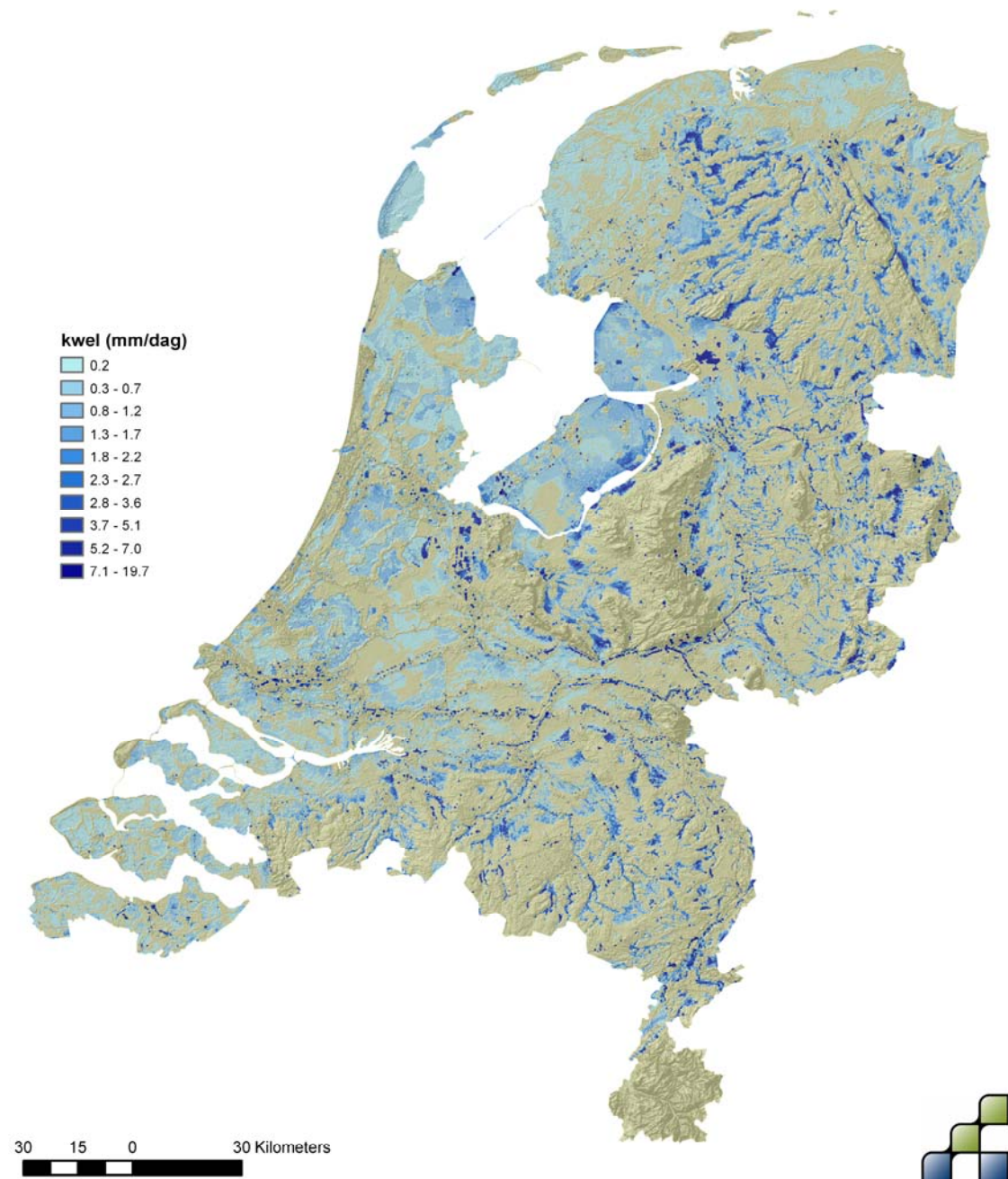
Figuur 5: Helling ter hoogte van het Veluwe massief

Na deze stappen te hebben genomen is er een tweetal beslisregels op cel basis geëvalueerd: (a.) cellen die meer dan 3 meter lager liggen dan hun omgeving hebben een gevoeligheid van 1 voor wateroverlast en cellen die een hoogte hebben gelijk aan hun omgeving hebben een gevoeligheid van 0 voor wateroverlast en (b.) cellen met een helling van meer dan 15 graden hebben een gevoeligheid van 0 en cellen met een helling van 0 hebben een gevoeligheid van 1. Alle overige cellen worden lineair geïnterpoleerd tussen deze grenswaarden.

4.2.2 Kwel en wegzijging

Er is gebruik gemaakt van de STONE database. Het model STONE is gezamenlijk ontwikkeld door de instituten RIVM, RIZA en Alterra om beleidsvragen van de Ministeries van VROM, V&W en LNV ten aanzien van het mestbeleid te kunnen beantwoorden. De hydrologische aspecten van STONE zijn samengesteld op basis van het hydrologische model SWAP (Van Dam et al., 1997; Kroes en Van Dam, 2003). De ruimtelijke schematisatie voor STONE is gemaakt ten behoeve van de berekeningen voor de Water Systeem Verkenningen (Kroon et al., 2001). De STONE gegevens hebben een ruimtelijke resolutie van 250 meter, terwijl de andere resultaten op een resolutie van 100 meter bepaald zijn. Om deze reden zijn de kwel gegevens neergeschaald naar de ruimtelijke resolutie van het AHN. Dit is gedaan door de middelpunten van de STONE gridcellen ruimtelijk te interpoleren met een spline interpolatie naar een resolutie van 100 meter (Franke, 1982).





Figuur 6: Neergeschaalde kwelkaart voor Nederland op basis van de STONE database

Op een overeenkomstige manier als voor de hoogtegegevens is op basis van de kwel een gevoeligheid voor wateroverlast bepaald. Gebieden die een kwelflux hebben die groter of gelijk is aan 5 mm/dag zijn gevoelig voor klimaatverandering (gevoeligheid = 1) en wegzijgingsgebieden zijn ongevoelig voor wateroverlast (gevoeligheid = 0). Alle tussenliggende waarden worden lineair geïnterpoleerd.

4.2.3 Grondwaterstanden

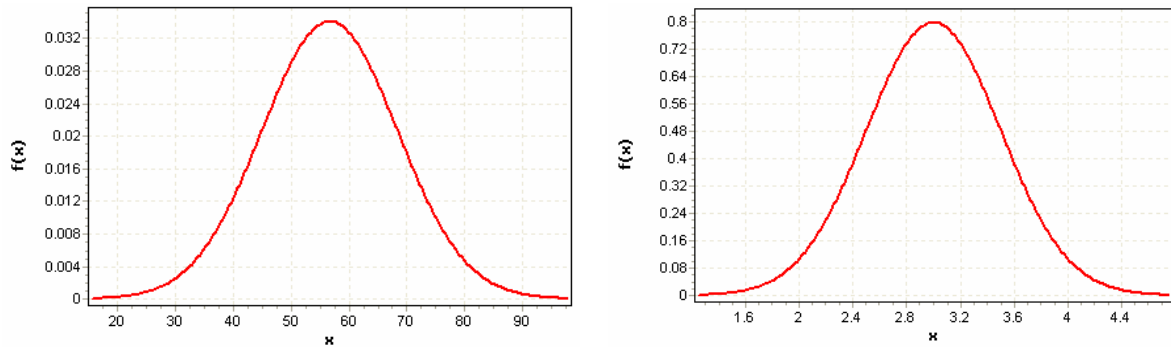
Er is gebruik gemaakt van een landelijke kaart van de Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG). De GHG is gedefinieerd als de top van de grondwaterregime curve en wordt berekend op basis van het gemiddelde van de HG3 voor een aaneengesloten periode van tenminste acht hydrologische jaren waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden. De HG3 is het gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden die uitgaande van een halfmaandelijke meetfrequentie worden waargenomen. Er is gebruik gemaakt van een GHG raster bestand met een resolutie van 25 meter (Van der Gaast *et al.*, 2005). Dit bestand is ontwikkeld aan de hand van een groot aantal peilbuis gegevens, de 1:50000 STIBOKA bodemkaart (Steur en Heijink, 1991) en het AHN. De bodemkaart is met uitzondering van openwater en bebouwd gebied gebiedsdekkend voor heel Nederland beschikbaar. De vlakken van de bodemkaart zijn verder gedetailleerd aan de hand het AHN en de peilbuis gegevens. Op basis van een grote reeks meetgegevens hebben de auteurs een relatie gelegd tussen de grondwatertrap (GT) uit de bodemkaart en het gemiddelde en de standaarddeviatie van de GHG (Tabel 2). Per GT is nu een kansverdeling bekend van de gemiddelde hoogte ten opzichte van het maaiveld. Met behulp van het AHN is ook per bodemvlak een gemiddelde en standaard deviatie van de maaiveldhoogten binnen een bodemvlak te bepalen. Door beide kansverdelingen te combineren kan de GHG worden neergeschaald naar een resolutie van 25 meter. Uitgangspunt hierbij is dat het 5% en 95% overschrijdingskansen uit de GHG en AHN verdelingen per bodemvlak met elkaar overeenkomen. De tussenliggende waarden van de verdeling worden lineair getransformeerd.

Tabel 2: Relatie tussen de GT en GHG, GVG en GLG op basis van tijdreeksen van peilbuisgegevens (Van der Gaast *et al.*, 2005)

GT	n	μ_{GHG}	σ_{GHG}	μ_{GVG}	σ_{GVG}	μ_{GLG}	σ_{GLG}
I	102	-5.3	12.2	10.6	11	36.5	9.2
II	78	4.8	14.4	28.1	13.5	65.6	8.7
II*	44	35.9	9.1	53.4	6.6	73.4	6
III	177	13.3	9	43.3	11	97.7	11.4
III*	108	32.7	4.2	60.4	7	101.9	11
IV	176	56.7	11.7	78.2	10.2	106.9	10.4
V	58	16.8	6.2	56.1	10.6	139.7	16.9
V*	118	33.5	4.3	70.5	10.1	145.6	22.4
VI	716	62.4	11.2	95.6	12.8	159.2	26.1
VII	1005	105.6	16.3	134.1	17.7	191.1	33
VIII	437	201.1	81	228.6	81.9	294.6	87.7

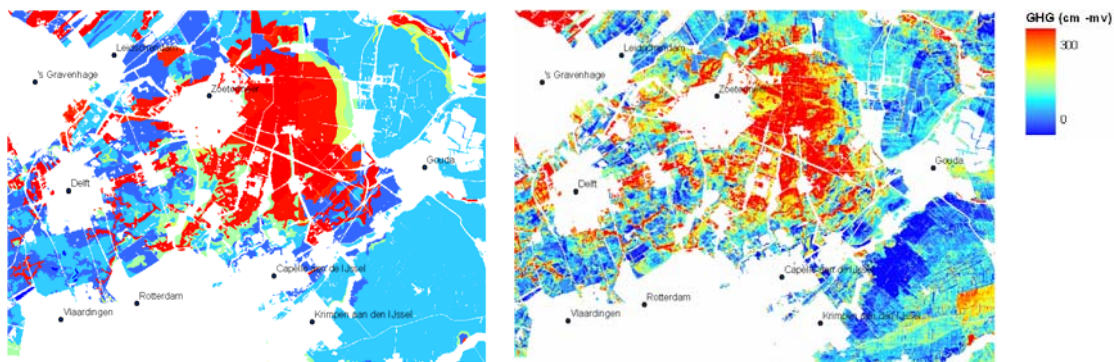
Dit wordt verder verduidelijkt aan de hand van Figuur 7. Aan de linkerkant is de GHG verdeling geplott en aan de rechterkant de maaiveldhoogten verdeling binnen een bodemvlak.





Figuur 7: Normale verdeling van de GHG van GT VII (links) en de normale verdeling van maaiveldhoogte van een bodemvlak met GT VII

De 5% overschrijdingskansen zijn gelijk aan 33 cm –mv en 200 cm +NAP. De 95% waarden zijn 80 cm –mv en 400 cm+NAP voor de GHG en AHN respectievelijk door de verdelingen aan elkaar gelijk te stellen. Een cel met een maaiveldhoogte van 240 cm +NAP zal bijvoorbeeld een GHG toegekend krijgen van 43 cm –mv. Door dit uit te voeren voor alle bodemvlakken worden een gebiedsdekkend raster van de GHG verkregen.

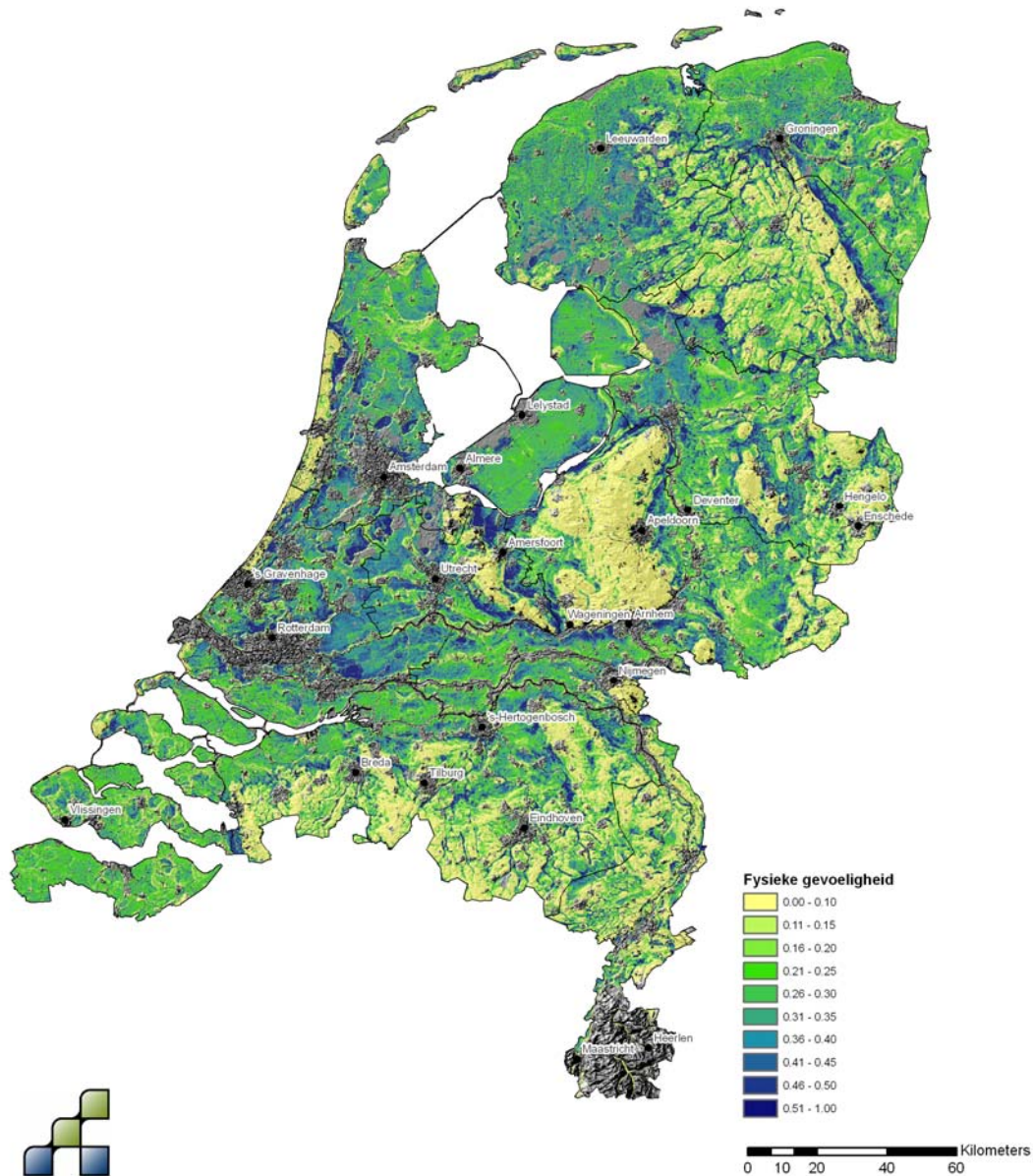


Figuur 8: Voorbeeld neerschalen GHG voor de Zuidplaspolder

In Figuur 8 wordt een voorbeeld gegeven van het neerschalen van de GHG voor de Zuidplaspolder. Het is duidelijk te zien dat er veel meer ruimtelijk onderscheid is na het neerschalen. De witte vlekken in de kaart zijn stedelijk gebieden, waarvoor geen bodemgegevens beschikbaar zijn.

4.2.4 Bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast

De uiteindelijke bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast wordt bepaald door de individuele gevoeligheden voor hoogte, helling, kwel en GHG met elkaar te vermenigvuldigen. Figuur 9 geeft de ruimtelijke bio-fysische gevoeligheid voor lokale wateroverlast weer.



Figuur 9: Bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast in Nederland

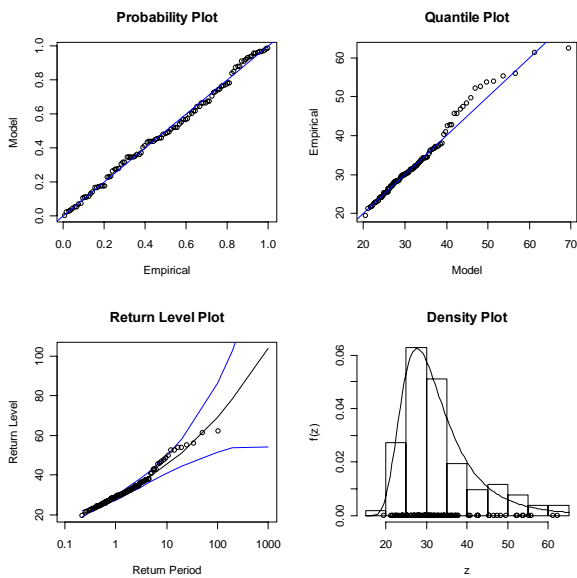
De laag gelegen polders in het rivierengebied, de droogmakerijen, en de knikpunten van het Veluwe massief en de Hondsrug zijn de meest opvallende locaties met een hoge gevoeligheid voor wateroverlast.

4.3 Extreme neerslag

Om de bio-fysische gevoeligheid voor wateroverlast te vertalen naar het werkelijke optreden van wateroverlast is een analyse gemaakt van de extreme neerslag voor de 13 hoofdstations van het KNMI. Voor elk van deze stations is de dagelijkse neerslagsom die hoort bij een herhalingstijd van respectievelijk 5, 10, 25, 50 en 100 jaar bepaald door een Generalized Extreme Value (GEV) verdeling te fitten door de maximale dagneerslag per jaar voor de periode 1906-heden (Smits et al., 2004). Door aan te nemen dat de extreme neerslag volgens de GEV



verdeling verdeeld is, is het mogelijk voor specifieke herhalingstijden de neerslagsom te bepalen.



Figuur 10: Voorbeeld fitten GEV verdeling door maximale jaarlijkse dagsom van de neerslag voor de Bilt van 1906-heden

Figuur 10 geeft een voorbeeld weer van de resultaten van de GEV fit op de maximale dagsommen van de neerslag in de Bilt. De figuren laten zien dat de GEV verdeling een goede benadering voor de extreme neerslag is. Het figuur linksonder laat zien dat voor herhalingstijden tot 1:100 jaar de geschatte neerslagsom zich binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval (blauwe lijnen) bevinden. Deze analyses zijn voor alle stations uitgevoerd en de resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Neerslagsommen hoofdstations in mm d⁻¹ bij verschillende herhalingstijden

Station	1 jaar	5 jaar	10 jaar	25 jaar	50 jaar	100 jaar
De Bilt	19	36	45	53	61	69
Roermond	15	38	45	54	61	69
Axel	18	40	49	63	76	91
Den Helder	19	36	43	56	62	82
Groningen	18	40	47	56	64	72
Heerde	18	42	50	63	74	87
Hoofddorp	18	41	46	54	59	65
Hoorn	17	39	46	55	62	70
Kerkwerve	18	42	48	57	64	70
Oudenbosch	18	41	49	61	72	84
West Terschelling	19	40	49	62	73	87
Winterwijk	17	41	47	56	62	69
Ter Apel	17	39	46	57	66	75



Voor alle herhalingstijden is vervolgens een ruimtelijke interpolatie uitgevoerd op basis van de 13 stations (Franke, 1982). Dit levert een zestal rasterkaarten op met de maximale neerslag op één dag bij herhalingstijden van 5, 10, 25, 50 en 100 jaar voor de huidige situatie. Voor het W scenario zijn deze rasters vermenigvuldigd met een factor 1.27 (zie Tabel 1).

4.4 Wateroverlast

Door de bio-fysische gevoeligheid te combineren met de maximale neerslagsommen bij verschillende herhalingstijden kan de herhalingstijd op wateroverlast worden bepaald. Per herhalingstijd wordt de bio-fysische gevoeligheid vermenigvuldigd met de neerslagsom. Het resultaat kan geïnterpreteerd worden als indicatieve extra te bergen hoeveelheid. Als deze hoeveelheid een grenswaarde van twee maal de maatgevende afvoer (~20 mm/dag) overschrijdt, kan er in de praktijk echt van wateroverlast worden gesproken. Of wateroverlast daadwerkelijk als wateroverlast wordt ervaren is afhankelijk van het landgebruik. Hiervoor zijn in het National Bestuursakkoord Water (NWP), dat in juli 2003 ondertekend is, werknormen vastgelegd waaraan het landgebruik in Nederland zou moeten voldoen. Voor grasland wordt bijvoorbeeld een norm van 1:10 jaar gebruikt en voor akkerbouw 1:25 jaar kaart (Tabel 4)

Tabel 4: Werknormen NBW

Landgebruik	Basis werk criterium [1/jr]
Grasland	1/10
Akkerbouw	1/25
Hoogwaardige land- en tuinbouw	1/50
Glastuinbouw	1/50
Bebouwd gebied	1/100

Voor het huidige en toekomstige landgebruik is gebruik gemaakt van de gegevens zoals gepresenteerd in NMP (2007). Voor het toekomstige landgebruik is uitgegaan van het trendscenario 2040.

Op basis van deze gegevens wordt de daadwerkelijke wateroverlast per pixel berekend. Het volgende rekenvoorbeeld maakt dit duidelijk. Een cel heeft een bio-fysische gevoeligheid van 0.6 in de huidige situatie is het landgebruik *akkerbouw*. Hier hoort een criterium bij van 1:25 jaar. Dit correspondeert met een extreme dagneerslag van ongeveer 60 mm (Tabel 3). De wateroverlast die voor deze cel berekend wordt is gelijk aan $0.6 \times 60 - 20 (= 2 \times \text{maatgevende afvoer}) = 16 \text{ mm}$. Stel dat rond 2050 het landgebruik veranderd is naar stedelijk gebied. Hier hoort een criterium bij van 1:100 jaar. Dit correspondeert met een extreme dagneerslag van



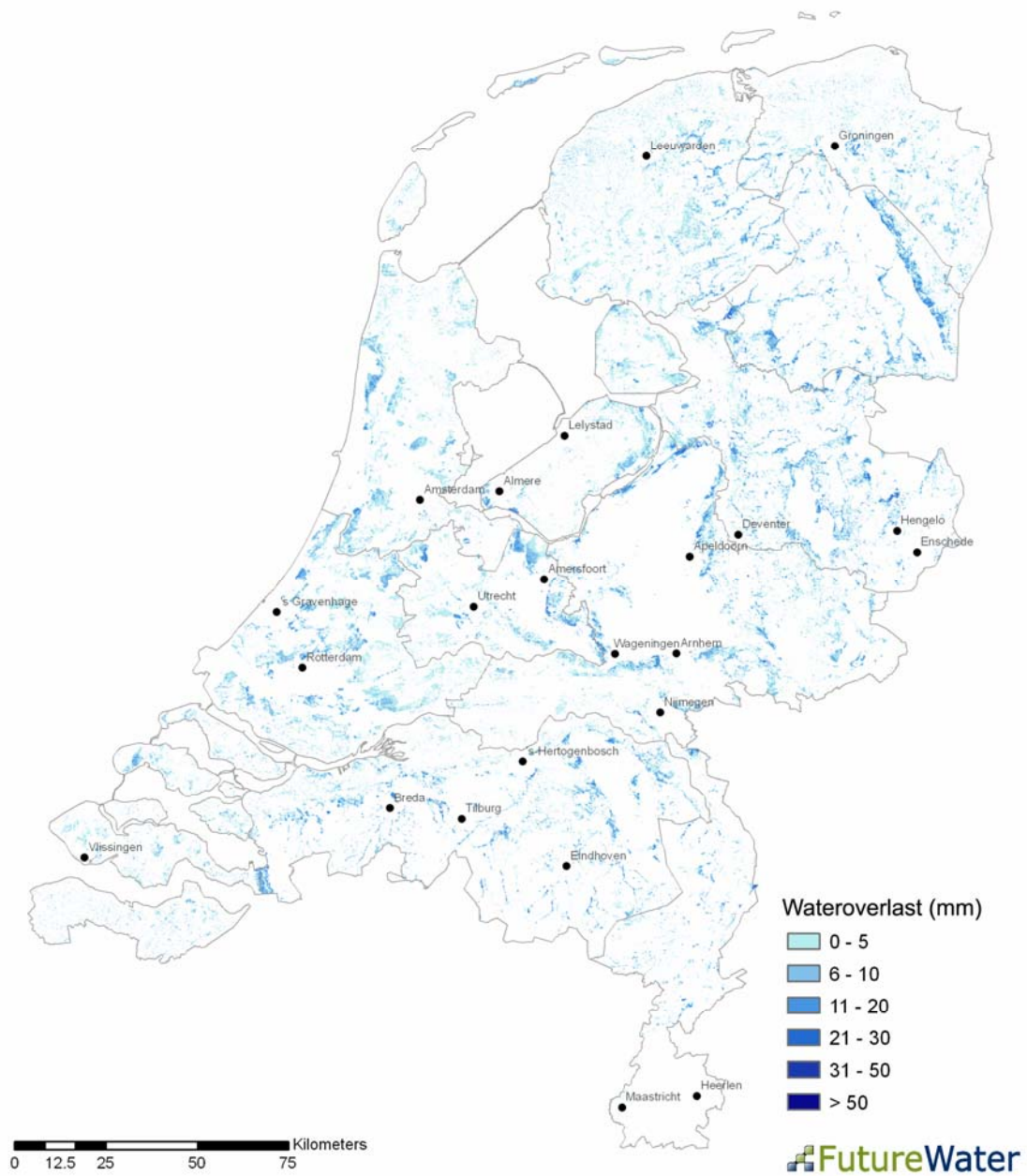
ongeveer 75 mm. De wateroverlast die dan voor 2050 voor deze cel wordt berekend is gelijk $0.6 \times 75 \times 1.27 = (\text{toename extreme neerslag in } W \text{ scenario}) - 20 = 37 \text{ mm}$.

Op deze manier worden zowel de klimatologische als de ruimtelijke ontwikkelingen meegenomen en er wordt rekening gehouden met het landgebruik afhankelijke toelaatbare wateroverlast per cel.



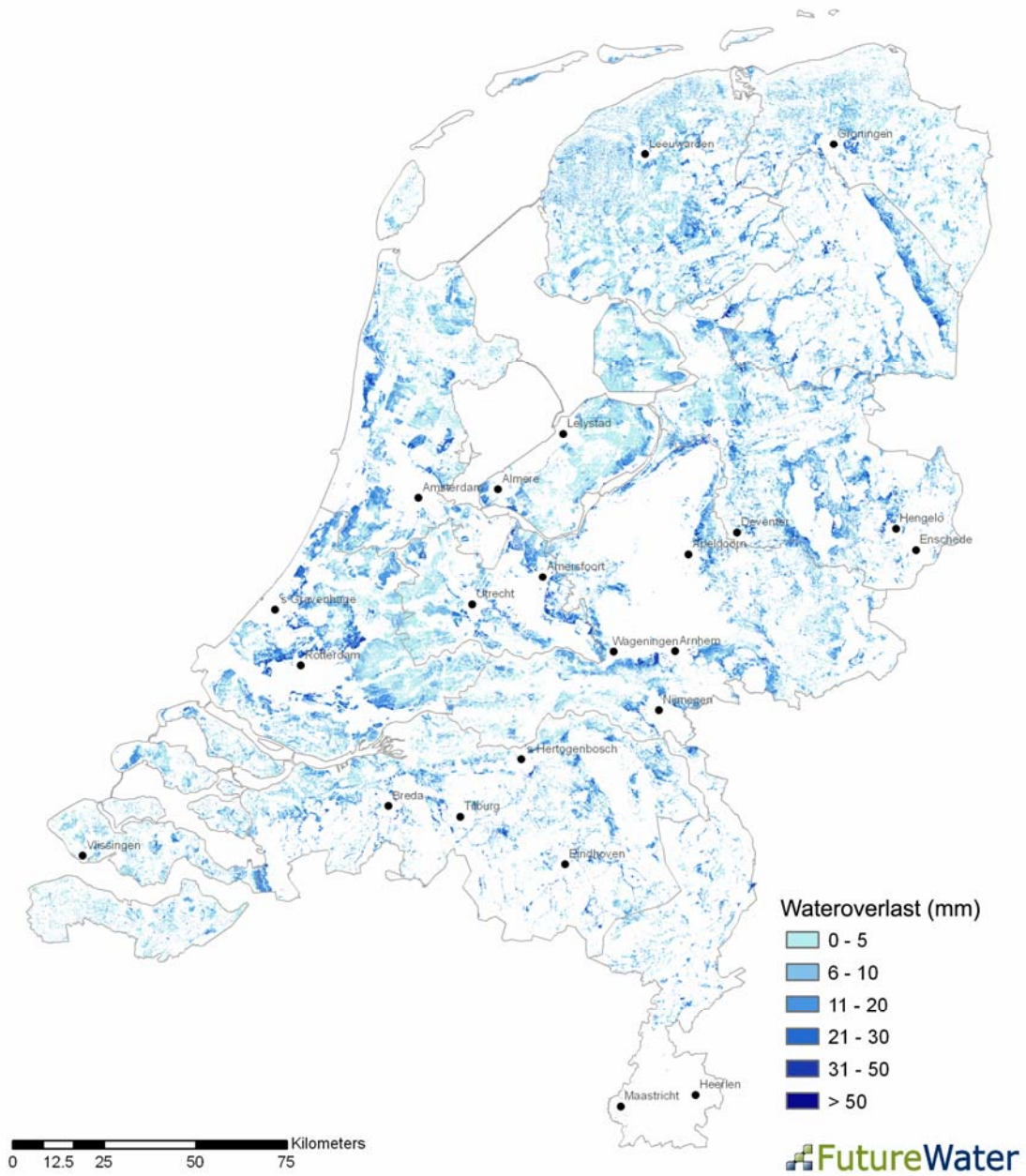


5 Resultaten



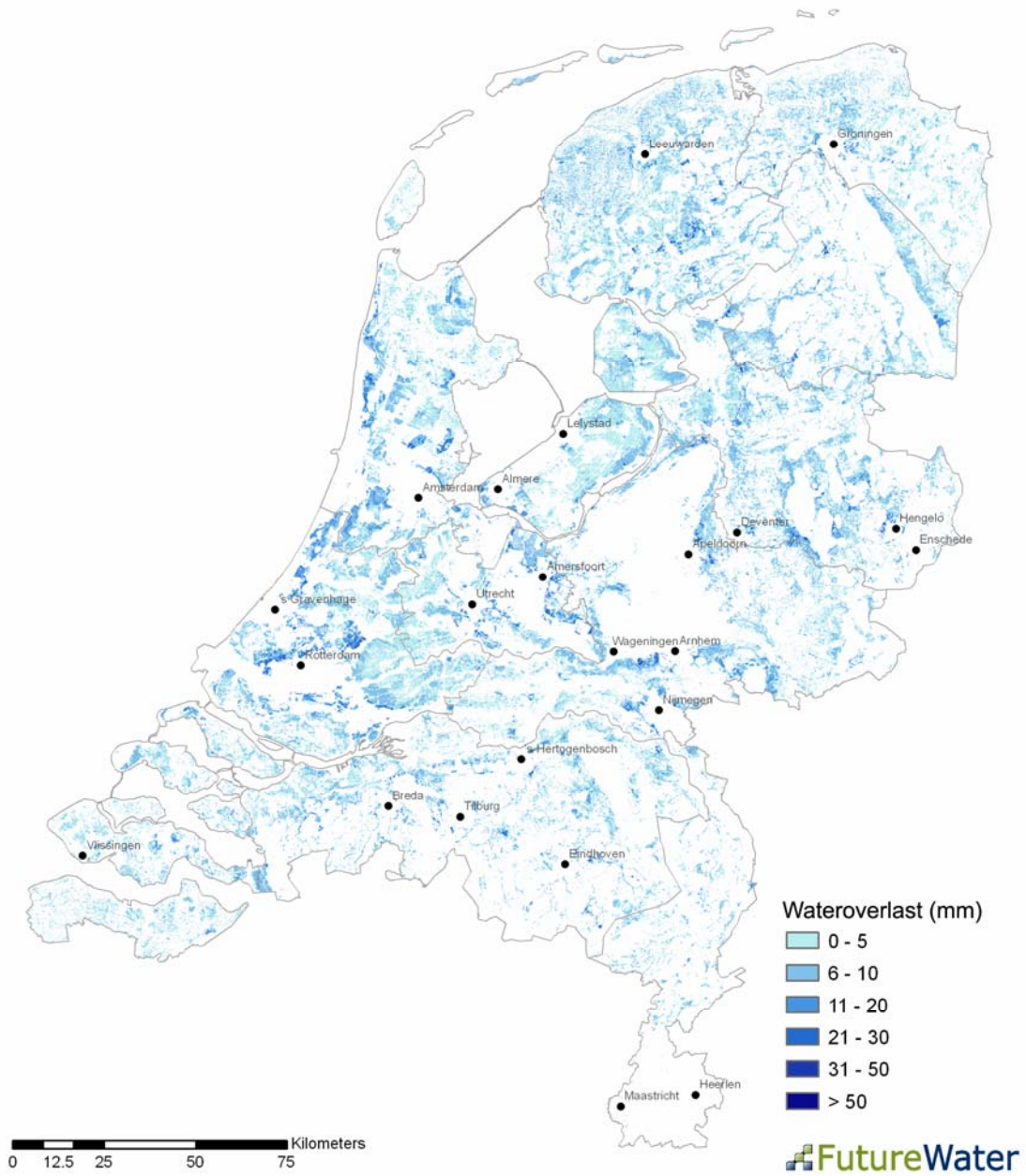
Figuur 11: Wateroverlast in mm voor de huidige situatie





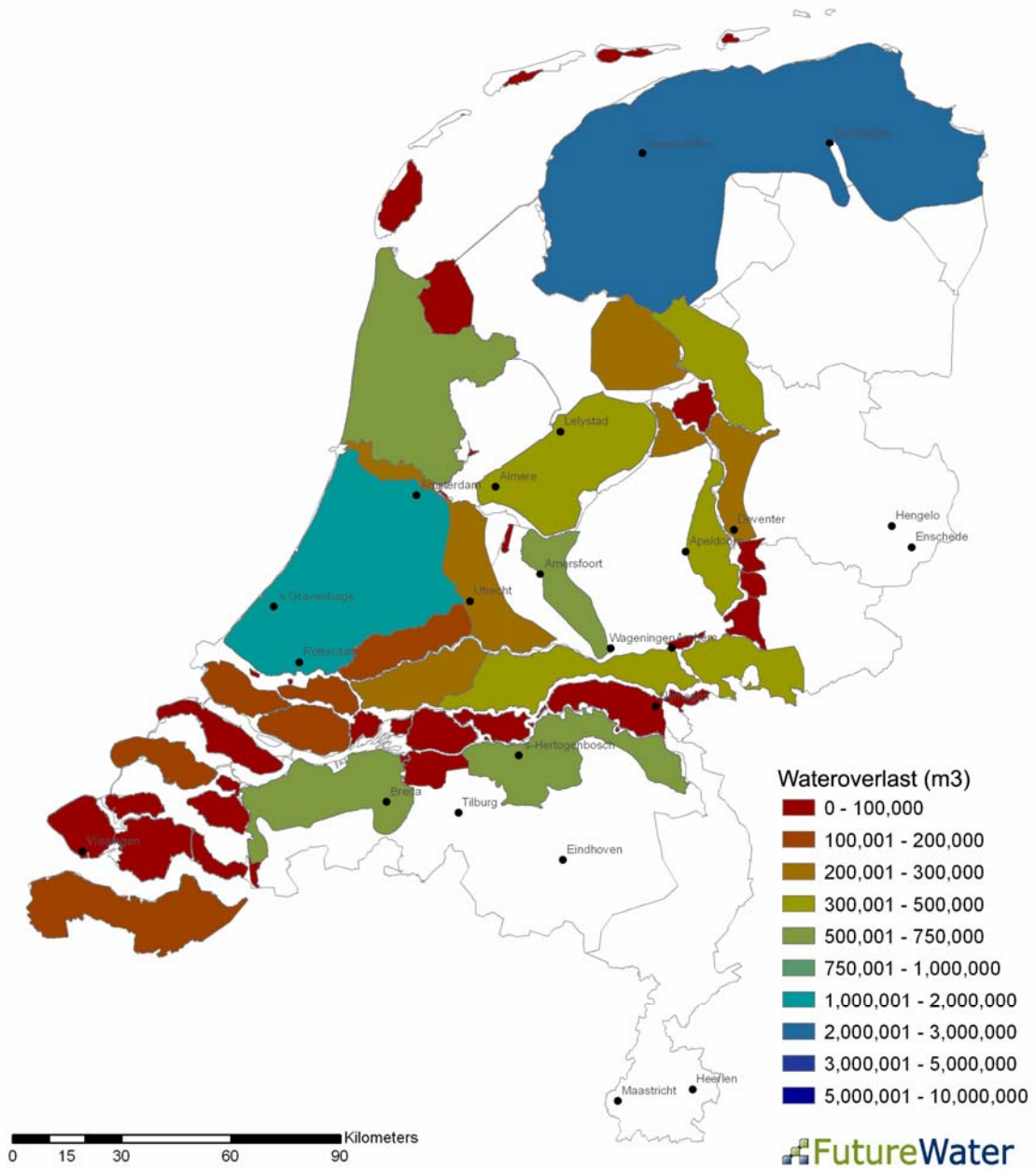
Figuur 12: Wateroverlast in mm voor het W scenario in 2050





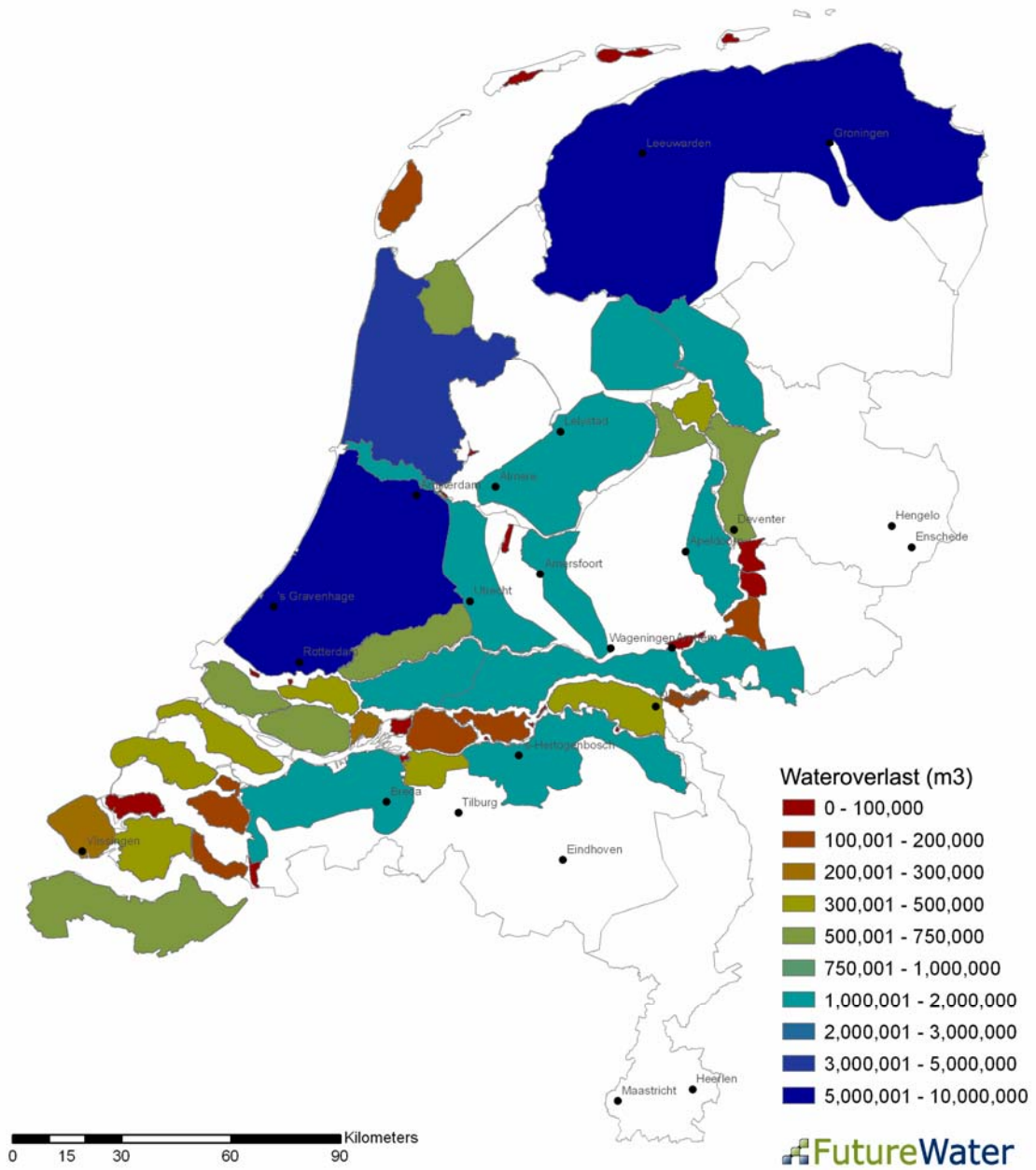
Figuur 13: Extra wateroverlast in mm (W scenario 2050 – huidige situatie)





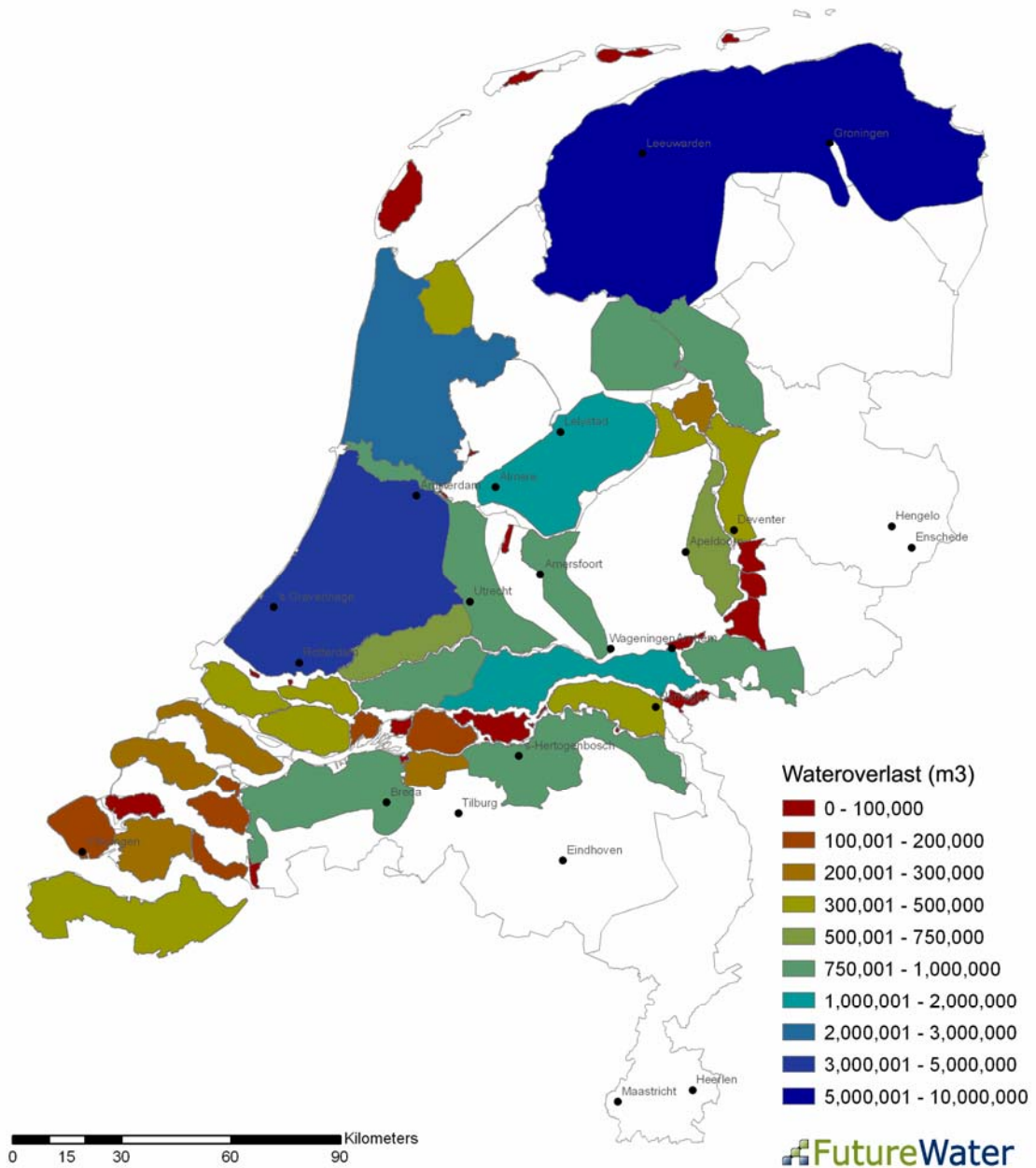
Figuur 14: Wateroverlast in m³ per dijkring voor de huidige situatie





Figuur 15: Wateroverlast in m³ per dijkring voor het W scenario in 2050





Figuur 16: Extra wateroverlast in m³ per dijkkring (W scenario 2050 – huidige situatie)



Tabel 5: Wateroverlast door onvoldoende ontwatering per dijkkring

Dijkkring	Oppervlakte (hectare)	Huidig (m3)	W 2050 (m3)	Verskil (m3)	% Verandering
Friesland en Groningen	493513	2617614	9914325	7296711	379
Zuid-Holland	222536	1671331	6320249	4648917	378
Noord-Holland	153093	718950	3164026	2445076	440
Flevoland	97405	463500	1807365	1343865	390
Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden	62595	396921	1524816	1127895	384
West-Brabant	73696	568157	1504655	936498	265
Gelderse Vallei	32470	566673	1438119	871446	254
Land van Heusden/de Maaskant	73153	537804	1403649	865846	261
Vollenhove	50645	398635	1311420	912785	329
Noordoostpolder	49367	262713	1147627	884914	437
Rijn en IJssel	36356	355045	1139878	784834	321
Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	39197	238346	1103813	865467	463
Oost Veluwe	30890	456538	1051356	594818	230
Kromme Rijn	63484	240154	1044317	804163	435
Lopiker- en Krimpenerwaard	31812	139536	747331	607794	536
Salland	28162	274539	735708	461168	268
Zeeuwsch Vlaanderen	71862	195850	694149	498299	354
IJsseldelta	11651	265700	580391	314691	218
Wieringen	22336	93515	571125	477610	611
Hoekse Waard	24544	143914	557434	413520	387
Voorne-Putten	19385	181008	529812	348804	293
IJsselmonde	12555	144597	467832	323234	324
Land van Maas en Waal	27929	92660	451403	358743	487
Zuid-Beveland	26089	93614	379634	286020	406
Schouwen Duiveland	22094	125966	368707	242740	293
Goeree-Overflakkee	22458	82029	360252	278224	439
Mastenbroek	9546	91833	325284	233451	354
Donge	12561	92797	323175	230378	348
Walcheren	20126	66492	225100	158608	339
Eiland van Dordrecht	4916	20303	200607	180305	988
Tholen en St. Philipsland	13878	62688	194676	131988	311
IJsselland	8688	87014	176305	89291	203
Zuid-Beveland	7546	35224	170385	135161	484
Land van Altena	16353	35716	155513	119797	435
Ooij en Millingen	3433	60745	142260	81515	234
Texel	12725	47435	103198	55764	218
Bommelerwaard	10887	9863	102318	92456	1037
Terschelling	1880	48941	95312	46371	195
Eempolder	1183	23333	94467	71134	405
Kreekrakpolder	1411	44814	85066	40252	190
Gorssel	4678	24429	68701	44273	281
Zutphen	4089	22062	50610	28548	229
Noord-Beveland	7753	10941	44755	33813	409
Ameland	3224	17784	41776	23992	235
Arnhemse- en Velpsebroek	2044	4978	11390	6412	229
Schiermonnikoog	824	824	5358	4534	650
Geertruidenberg	358	856	2321	1465	271
Heerwaarden	236	27	343	315	1263
Marken	241	190	251	61	132
Biesbosch	2065	1131	175	-956	15
Nederhemert	96	18	29	11	163
Keent	104	2	21	19	1188
Vlieland	23	0	0	0	0
Rozenburg	305	0	0	0	0
Pernis	154	0	0	0	0
Alem	94	0	0	0	0
IJburg	185	0	0	0	0



6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de resultaten (Figuur 11 - Figuur 16 en **Error! Reference source not found.**) kunnen de volgende conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan:

De wateroverlast door onvoldoende ontwateringscapaciteit om de lokale effecten van extreme neerslag op te vangen is aanzienlijk. In de huidige situatie treedt wateroverlast lokaal op in Zuid-Holland, Noord-Holland, de randen van het Veluwe offensief en de Hondsrug en in de beekdalen (Figuur 11). Uit Figuur 12 en Figuur 13 blijkt dat in de toekomst onder het W scenario en het MNP Trendscenario een flinke toename in de wateroverlast te verwachten is. Het areaal neemt enorm toe en daarnaast ook de absolute hoeveelheden.

In hoofdstuk 2 is onderscheid gemaakt tussen de verschillende typen wateropgave, waarvoor de volgende schattingen gemaakt kunnen worden:

- Toename van de gemiddelde winter drainage uit poldersystemen (Kwadijk, 2007). Kwadijk (2007) berekent voor het W scenario gedurende het winterseizoen een gemiddelde toename van 268 MCM per winterseizoen. Deze analyse beslaat alle dijkkringen van Nederland.
- Wateroverlast ten gevolge van inundatie uit het regionale oppervlakte watersysteem (NBW). Het MNP (Kragt et al., 2006) rapporteert in een eerste WB21 audit dat de wateropgave (zoals gedefinieerd volgens het NBW) tussen de 238 en 425 miljoen m³ bedraagt (afhankelijk van de gevolgde methodiek: alle deelstroomgebiedsvizies uit 2003 of op basis van een toets bij 22 waterschappen). Deze hoeveelheden hebben betrekking op de totale wateropgave in 2050 volgens het middenscenario WB21 en heeft dus zowel betrekking op langdurige natte periode als op het afwateringssysteem en het ontwateringssysteem.
- Lokale wateroverlast ten gevolge van toenemende extreme neerslag en veranderend landgebruik en een gelimiteerde ontwateringscapaciteit. Voor heel Nederland geldt dat er in de huidige situatie een lokale wateroverlast van 19 miljoen m³ (alleen dijkkringen = 12 miljoen m³) is. In 2050 (klimaatscenario W en MNP Trendscenario) wordt dit in totaal 61 miljoen m³ (alleen dijkkringen = 43 miljoen m³). Dit is een toename van 350%. De vastgestelde lokale wateroverlast in het ontwateringssysteem zoals gepresenteerd in deze studie (klimaat en landgebruik) bedraagt dus rond de 15%-25% van de totale wateropgave zoals gedefinieerd in het NBW dat **extra** geborgen moet worden.

Uit Figuur 15 en Figuur 16 en **Error! Reference source not found.** blijkt dat er grote verschillen bestaan tussen de dijkkringen. De top drie wordt gevormd door Friesland en Groningen (huidig = 2.6 MCM, W = 9.9 MCM), Zuid-Holland (huidig = 1.7 MCM, W = 6.3 MCM)



en Noord-Holland (huidig = 0.7 MCM, W = 3.2 MCM). Deze dijkringen laten ook de grootste absolute toename zien hier zullen dus de meeste maatregelen getroffen moeten worden.

De gepresenteerde methode is zeer geschikt gebleken om voor geheel Nederland lokale wateroverlast als gevolg van extreme neerslag in kaart te brengen op een eenduidige manier. De combinatie van lokale bio-fysische eigenschappen met klimatologische gegevens en landgebruiksveranderingen maken het mogelijk om met een relatief hoog ruimtelijk detail uitspraken te doen over het optreden van wateroverlast.





7 Literatuur

- AHN, 2005. Actueel Hoogte Bestand Nederland. <http://www.ahn.nl>
- Franke R. 1982. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Comp. & Maths. with Appls.* 8: 237-281.
- Kors, A.G., Claessen, F.A.M., Wesseling, J.W. en Können, G.P. 2000. Scenario's externe krachten t.b.v. WB21. RIZA, Lelystad.
- Kragt F.J., Van Gaalen F.W., Cleij P., Ligtvoet W. 2006. Audit WB21: Eerste analyse opgave wateroverlast regionaal watersysteem t.b.v. LBOW. MNP rapport 555060001. MNP: Bilthoven
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World Research. Alterra-report 773. Wageningen, Nederland.
- Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom, en A.H.W. Beusen. 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. RIZA rapport 2001.017, Lelystad, Nederland.
- Kwadijk, J. 2007. Regionale wateroverlast. Project Aandacht voor Veiligheid (in press). Milieu en natuurplanbureau. 2007. Nederland Later. Tweede Duurzaamheidsverkenning, deel Bio-fysische leefomgeving Nederland. MNP: Bilthoven
- Nationaal Bestuursakkoord Water. 2003.
http://www.verkeerenwaterstaat.nl/Images/nbw_tcm195-101463.pdf
- RIZA, 2003. Nationale Droogtestudie, <http://www.droogtestudie.nl>
- Smits, A., Wijngaard, J.B., Versteeg, R.P., Kok, M., 2004. Statistiek van extreme neerslag in Nederland. STOWA rapport. Utrecht
- Steur, G.G.L., Heijink, W. 1991. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000. Algemene begrippen en indelingen. Staring Centrum. Wageningen.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. Van Walsum, P. Groenendijk, and C.A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre. Technical Document 45.
- Van der Gaast, J.W.J., Massop, H. Th. L., Vroon, J., Staritsky, I.G., 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Alterra rapport 1339. Wageningen.
- Van den Hurk B.J.J.M., Tank A.K., Lenderink G., Van Ulden A., Van Oldenborgh G.J., Katsman C., Van den Brink H., Keller F., Bessembinder J., Burgers G., Komen G., Hazeleger W., Drijfhout S. 2006. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR2006-01. De Bilt.

