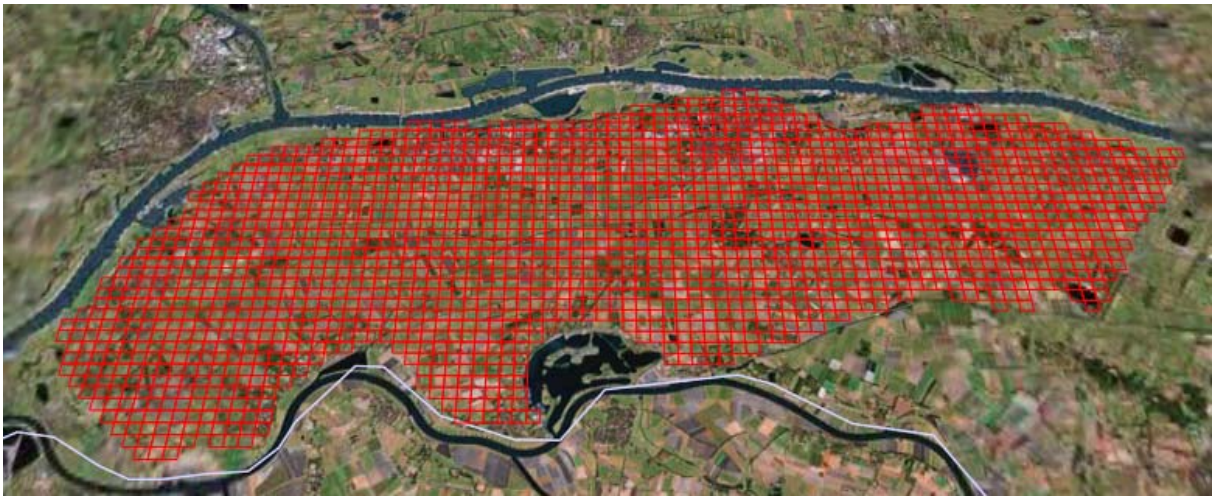
FutureViewR: gedetailleerd hydrologisch en oppervlaktewater model getest op Quarles van Ufford



Future Water
Science for Solutions

FutureViewR: gedetailleerd hydrologisch en oppervlaktewater model getest op Quarles van Ufford

Januari 2007

Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland
Uitvoerder: FutureWater
Costerweg 1G
6702 AA Wageningen
tel: 0317 460050
email: info@futurewater.nl
web: www.futurewater.nl

Begeleiders: G.A.P.H. van den Eertwegh (Waterschap Rivierenland)
J. Spieksma (Waterschap Rivierenland)
H. Ketelaar (Waterschap Rivierenland)

Auteurs: W.W. Immerzeel (FutureWater)
C.C. van Heerwaarden (FutureWater)
P. Droogers (FutureWater)

Samenvatting

Bij het waterschap Rivierenland is de strategische lange termijn keuze gemaakt om een complete gekoppelde suite van hydrologische en hydraulische modellen te operationaliseren om de waterproblematiek in het beheersgebied integraal te kunnen benaderen. De intentie is om een koppeling te leggen tussen bestaande modellen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen (i) het grondwater systeem, (ii) de onverzadigde zone inclusief de interactie tussen bodem, water, gewassen en atmosfeer, en (iii) het oppervlakte watersysteem. Het uiteindelijke doel is om de verschillende systemen aan elkaar te koppelen. Het realiseren van deze ambitie van het waterschap op de lange termijn zal gepaard gaan met een aanzienlijke investering. Voordat dit traject definitief wordt ingezet heeft het Waterschap FutureWater gevraagd om een essentieel onderdeel verder uit te werken: een nauwkeurige beschrijving en simulatie van kwel en wegzijgingsprocessen en de invloed hiervan op het oppervlaktewater. Als basis is gekozen de FutureView methode, die is uitgebreid met een hogere ruimtelijke resolutie en gekoppeld aan een openwater module. Deze opzet, FutureViewR genaamd, is gebouwd en toegepast op het Quarles van Ufford gebied. Het instrumentarium wordt in deze studie verder gebruikt en getest om de effecten van klimaatverandering op de hydrologie van de polder te evaluaeren.

De hoofddoelstelling van het project is het ontwikkelen van een gedetailleerd ruimtelijk gedifferentieerd modelinstrumentarium inclusief open water module voor de polder Quarles van Ufford. Door eerst de ruimtelijke differentiatie verder uit te werken in het FutureViewR model en vervolgens een eenvoudig oppervlakte watermodel hier aan te koppelen is aan deze doelstelling ruimschoots voldaan. De resultaten zijn veelbelovend en een vergelijk tussen waargenomen en gesimuleerde afvoeren schept vertrouwen in de methodiek. Het sterke punt van het instrumentarium is het detail niveau waarmee hydrologische processen kunnen worden meegenomen. Normaliter ligt de focus bij het oppervlakte watersysteem en de ruimtelijke en temporele patronen in hydrologie worden zeer beperkt meegenomen. In dit instrument ligt de focus juist op de ruimtelijke gedifferentieerde hydrologische situatie, maar wel met een duidelijke koppeling met het oppervlaktewater systeem.

De nieuwe KNMI scenario's zijn gebruikt om de effecten van klimaatverandering op de hydrologie in de polder te bestuderen. De tijdreeks met neerslag en referentie verdamping voor de periode van 1995 tot 2004 is getransformeerd tot een tijdreeks rond het jaar 2050. Omdat veranderingen in rivierwaterstanden gevolgen hebben voor de kweldynamiek in de polder is er gebruik gemaakt van initiële klimaatverandering simulaties uitgevoerd in opdracht van RIZA om de rivierwaterstanden in de Waal en de Maas te simuleren. Uit deze eerste resultaten volgt dat de rivierwaterstanden niet dusdanig veranderen dat dit grote effecten heeft op de kweldynamiek in de polder Quarles van Ufford. Een groter effect heeft de lokale verandering in neerslag en referentie verdamping. De winters worden natter, de zomers droger en de referentie verdamping neemt flink toe, met name in de zomer en het najaar. Hierdoor is vooral in de zomer meer wateraanvoer nodig om gewasopbrengsten te garanderen.

Naast een aantal concrete aanbevelingen om het huidige model te verbeteren zijn er ook een aantal mogelijke toekomstige uitbreidingen voor de methodiek geformuleerd.

Inhoudsopgave

SAMENVATTING 3

1 INLEIDING 9

1.1 Aanleiding tot het project 9
1.2 Doelstelling 9
1.3 Uitgangspunten 10

2 RUIMTELIJKE DETAILLERING FUTUREVIEW MODEL: FUTUREVIEWR 11

2.1 Inleiding 11
2.2 Parameterisatie model gegevens 14
2.3 FutureViewR invoer 17

3 IMPLEMENTATIE OPPERVLAKTEWATER 23

4 KOPPELING FUTUREVIEWR EN OPPERVLAKTEWATER MODEL 29

5 TECHNISCHE IMPLEMENTATIE 31

6 VERANDERING HYDROLOGIE TEN GEVOLGE VAN KLIMAATVERANDERING 33

6.1 Methode 33
6.1.1 WB21 scenario's 34
6.1.2 KNMI'06 scenario's 35
6.2 Klimaatscenario's voor Waterschap Rivierenland 36
6.2.1 Veranderingen in neerslag en potentiële verdamping 37
6.2.2 Verandering in rivier waterstanden 38
6.3 Huidige situatie 39
6.4 Klimaatverandering: het W+ scenario in 2050 48

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 59

7.1 Hoofddoelstelling 59
7.2 Nevendoelstellingen 59
7.2.1 Ervaringen gekoppelde modelsuite gebruiken in de toekomst 59
7.2.2 Beschrijving opzetten model vanuit basisgegevens 60
7.2.3 Presentatie resultaten in een GIS omgeving 60
7.2.4 Klimaatverandering en effecten op de hydrologie 60
7.3 Aanbevelingen 61

8 REFERENTIES 63

Tabellen

Tabel 1. De drie drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse. 19
Tabel 2: Karakteristieken MWO13 25
Tabel 3. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050. 35
Tabel 4. Maandelijkse procentuele verandering in het aantal natte dagen (f_{wet}), gemiddelde neerslag op een natte dag (m_{wet}), en het 99% percentiel (Q_{99}) voor 2050 en 2100. 37
Tabel 5. Gemiddelde procentuele verandering in potentiële verdamping per seizoen: DJF = december, januari, februari, MAM = maart, april, mei, JJA = juni, juli, augustus, SON = september, oktober, november. 37
Tabel 6. Gemiddelde seizoensneerslag en potentiële verdamping voor 1995-2004, 2045-2054 en 2095-2104 vpr het W+ scenario. 38
Tabel 7. Gemiddelde maandelijkse water balansen voor de gehele polder voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie 40
Tabel 8. Gemiddelde maandelijkse water balansen voor de gehele polder voor de periode 1995-2004 voor het W+ scenario 49

Figuren

Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997). 11
Figuur 2. Schematische weergave van rivierhoogtecorrectie. 17
Figuur 3. Hoogteligging op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland 18
Figuur 4. Bodemfysische klasse van de toplaag van de bodem op basis van Wösten et al. (2001) 18
Figuur 5. Landgebruik in Quarles van Ufford. 19
Figuur 6. Weerstand voor het primaire drainage niveau 20
Figuur 7. Weerstand voor het secundaire drainage niveau 20
Figuur 8. Aanwezigheid van zandbanen 21
Figuur 9: Locatie peilgebied MWO13 25
Figuur 10: Fluxen naar de representatieve waterloop MWO13. 26
Figuur 11: Verloop van de afvoer gedurende een dag. Op t=0 is de afvoer gelijk aan de maatgevende afvoer. 27
Figuur 12: Berekende afvoeren na toepassing correctie factor over de representatieve stuw. Q_0 is de afvoer bij een verkeerde tijdintegratie. Q is de gecorrigeerde afvoer (waterloop MWO13) 28
Figuur 13: Kruinhoogte stuw en berekende peilen (waterloop MWO13) 28
Figuur 14: RAM gebieden en schematische afwatering 29
Figuur 15: Orde van de RAM gebieden 30
Figuur 16: Toekenning rastercellen aan RAM gebieden 30
Figuur17: Grid zoals toegepast voor de berekeningen van de klimaatprojecties door het HadCM3 GCM. 34
Figuur18: 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. 36
Figuur19: Effect van klimaatverandering (W+, 2050) op de waterstanden bij Tiel op basis van de 2003 meetreeks. 39
Figuur 20: Waterbalansen voor verschillende periodes voor Quarles van Ufford 40
Figuur 21: Gemiddelde jaarlijkse som actuele transpiratie en evaporatie voor de periode 1995-2004 41
Figuur 22: Totale verdampingstekort gedurende de zomer van 2003 41
Figuur 23: Gemiddelde jaarlijkse kwel/wegzijging voor de periode 1995-2003 (negatieve waarde = wegzijging) 42
Figuur 24: Kwel/wegzijging in de winter van 1995 (negatieve waarde = wegzijging) 42
Figuur 25: Kwel/wegzijging in de zomer van 2003 (negatieve waarde = wegzijging) 43
Figuur 26: Gemiddelde drainage/infiltratie in de zomer voor de periode 1995-2004 (negatieve waarde = infiltratie). 43
Figuur 27: Drainage/infiltratie in de zomer van 2003 (negatieve waarde = infiltratie) 44
Figuur 28: Gemiddelde jaarlijkse runoff voor de periode 1995-2004 44
Figuur 29: GLG gebaseerd op 1995-2004 gegevens 45
Figuur 30: GHG gebaseerd op 1995-2004 gegevens 45
Figuur 31: Gemiddelde relatieve opbrengst op 30 september voor de periode 1995-2004 46
Figuur 32: Relatieve opbrengst op 30 september 2003 46
Figuur 33: Relatieve uitstroom als percentage van totale uitstroom bij gemaal Quarles van Ufford voor de huidige situatie 47

Figuur 34: Gemeten en gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder..... 48
Figuur 35: Waterbalans voor verschillende perioden voor het W+ scenario 49
Figuur 36: Gemiddelde jaarlijkse som actuele transpiratie en evaporatie voor de periode (gemiddeld 2050)..... 50
Figuur 37: Totale verdampingstekort gedurende de zomer van 2050d 50
Figuur 38: Gemiddelde jaarlijkse kwel/wegzijging (gemiddeld 2050) (negatieve waarde = wegzijging) 51
Figuur 39: Kwel/wegzijging in de winter van 2050n (negatieve waarde = wegzijging)..... 51
Figuur 40: Kwel/wegzijging in de zomer van 2050d (negatieve waarde = wegzijging)..... 52
Figuur 41: Gemiddelde drainage/infiltratie in de zomer (gemiddeld 2050) (negatieve waarde = infiltratie) 52
Figuur 42: Drainage/infiltratie in de zomer van 2050d (negatieve waarde = infiltratie)..... 53
Figuur 43: Gemiddelde jaarlijkse runoff (gemiddeld 2050)..... 53
Figuur 44: GLG 2050..... 54
Figuur 45: GHG 2050..... 54
Figuur 46: Gemiddelde relatieve opbrengst op 30 september (gemiddeld 2050) 55
Figuur 47: Relatieve opbrengst op 2050d 55
Figuur 48: Relatieve uitstroom als percentage van totale uitstroom bij gemaal Quarles van Ufford voor het W+ scenario..... 56
Figuur 49: Gesimuleerde afvoer (huidig en W+) bij het hoofdgemaal van de polder voor de periode 2000-2004..... 57

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het project

Bij het waterschap Rivierenland is de strategische lange termijn keuze gemaakt om een complete gekoppelde suite van hydrologische en hydraulische modellen te operationaliseren om de waterproblematiek in het beheersgebied integraal te kunnen benaderen.

De intentie is om een koppeling te leggen tussen bestaande modellen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen (i) het grondwater systeem, (ii) de onverzadigde zone inclusief de interactie tussen bodem, water, gewassen en atmosfeer, en (iii) het oppervlakte watersysteem. Voor het grondwatersysteem is het model MODFLOW over het algemeen de standaard, voor de onverzadigde zone is het SWAP model (eventueel aangevuld met ANIMO) de voor de hand liggende keuze en voor het openwater systeem bestaat er de keuze uit de modellen DUFLOW, SOBEK en AQUARIUS. Daarnaast bestaat er SIMGRO dat de integratie van de drie genoemde systemen van de hydrologische cyclus integraal simuleert. Het waterschap heeft reeds beperkte ervaring in het gebruik van een aantal van deze modellen. Het uiteindelijke doel is om de verschillende systemen aan elkaar te koppelen. Er dient hierbij onderscheid gemaakt te worden tussen statische koppeling en een dynamische koppeling. Een statische koppeling worden modellen achtereenvolgens gerund en worden de resultaten van de één gebruikt als invoer van de ander terwijl bij een dynamische koppeling de modellen op tijdstap basis aan elkaar worden gekoppeld. Een dynamische koppeling kan betere resultaten leveren, zolang de modellen individueel voldoende nauwkeurig zijn. Dit laatste is vaak niet zozeer een beperking in de kennis van processen ingebouwd in de modellen, maar een beperking in beschikbare invoergegevens in (i) kwaliteit, (ii) ruimtelijke spreiding en (iii) temporale spreiding. Het waterschap gaat de komende tijd aan de hand van case studies inventariseren wat de beste keuze is voor de toekomst.

Het realiseren van deze ambitie van het waterschap op de lange termijn zal gepaard gaan met een aanzienlijke investering. Voordat dit traject definitief wordt ingezet heeft het Waterschap FutureWater gevraagd om een essentieel onderdeel verder uit te werken: een nauwkeurige beschrijving en simulatie van kwel en wegzijgingsprocessen en de invloed hiervan op het oppervlaktewater. Als basis is gekozen de FutureView methode, die is uitgebreid met een hogere ruimtelijke resolutie en gekoppeld aan een openwater module. Deze opzet, FutureViewR genaamd, is gebouwd en toegepast op het Quarles van Ufford gebied.

1.2 Doelstelling

Gezien bovenstaande achtergrond is de hoofddoelstelling van deze studie:

Het ontwikkelen van een gedetailleerd ruimtelijk gedifferentieerd modelinstrumentarium inclusief open water module voor de polder Quarles van Ufford.

Een aantal nevendoelstellingen van deze studie zijn:

- De studie zodanig inrichten dat de ervaringen direct gebruikt kunnen worden bij het opzetten van de gekoppelde model suite in de toekomst.
- In een duidelijk stappenplan beschrijven hoe vanuit basis GIS gegevens het model kan worden opgezet.
- Het instrumentarium dusdanig opzetten dat resultaten eenvoudig ruimtelijk in een GIS kunnen worden gepresenteerd.
- Inzicht te krijgen in veranderingen in hydrologie, vooral kwel en wegzijging, processen onder klimaatverandering.

1.3 *Uitgangspunten*

Om tot het gewenste projectresultaat te komen zal de studie gefaseerd uitgevoerd worden (zie stappenplan hierna). De belangrijkste uitgangspunten van deze aanpak zijn gebaseerd op:

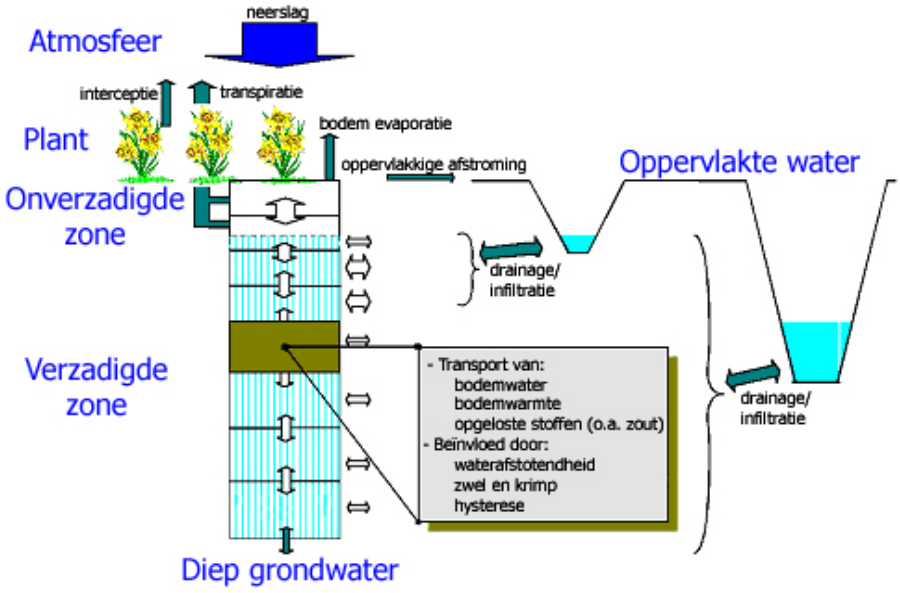
- De modelontwikkeling vindt plaats in nauwe samenwerking met het Waterschap
- Er wordt gebruikt gemaakt van de bestaande modellen (bestaande FutureView model) en kennis.
- Bij de uitvoering van het project wordt rekening gehouden met lange termijn ambities van het waterschap met betrekking tot het ontwikkelen van het model instrumentarium.
- Er wordt veel aandacht besteedt aan de op GIS gebaseerde ruimtelijke presentatie van de resultaten.
- Aansluiting met het BSIK Klimaat voor Ruimte programma.

2 Ruimtelijke detaillering FutureView model: FutureViewR

2.1 Inleiding

De FutureView methode is volledig gebaseerd op het SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) model met een actieve koppeling naar een database. FutureView maakt gebruik van rekeneenheden, waarbij een rekeneenheid is gedefinieerd als een homogeen gebied voor wat betreft streefpeil, hoogte, drooglegging, grondgebruik, bodem, drainageweerstanden etc. Elke rekeneenheid vormt zo één SWAP kolom.

Het SWAP model simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. Figuur 1 laat schematisch de werking van het SWAP model zien voor wat betreft de processen in bodem—water—atmosfeer; een uitgebreidere beschrijving kan gevonden worden in Kroes en Van Dam (2003).



Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997).

In het verleden werd voor drainagesystemen vaak gebruik gemaakt van zogenaamde steady-state methoden, waarbij met behulp van een aantal aannames en vereenvoudigingen een redelijke schatting van de gewenste drainage kon worden bepaald. De drainage vergelijkingen van onder andere Hooghoudt (1940) en Ernst (1956) worden wereldwijd toegepast.

Het nadeel van een steady-state aanpak is de vele vereenvoudigingen en vooral het ontbreken van enige dynamiek in de tijd. Met een model kan deze dynamiek uitstekend gesimuleerd worden en kunnen bovendien andere interacties, zoals met de vegetatie, worden meegenomen.

Het basis concept van ontwatering in het SWAP model berust, evenals bij de interactie van het diepe grondwater met het freatisch grondwater, op de verschillen in stijghoogten en een bepaalde weerstand:

$$q_{drain} = \frac{\phi_{gwl} - \phi_{drain}}{R_{drain}}$$

met q_{drain} : de flux vanuit de bodem naar de drain (cm d^{-1})
φ_{gwl} : de diepte van de grondwaterspiegel (cm)
φ_{drain} : de stijghoogte in de drain (cm)
R_{drain} : de drainageweerstand (d).

De modelaanpak voor de ontwatering en aftwatering is uitgebreider dan hier beschreven. Zo wordt de drainageweerstand gesplitst in een weerstand vanuit de bodem naar het drainagesysteem (buis, greppel of sloot) en de intree weerstand van het drainagesysteem zelf. Uiteraard is de afstand tussen de verschillende drains een andere belangrijke factor die de totale drainage dynamiek bepaalt. Voor een volledige beschrijving van de representatie van de drainage in het SWAP model wordt verwezen naar Kroes en Van Dam (2003).

Er wordt gebruikt gemaakt van een vijftal verschillende landgebruik typen; akker, bos, stad, water en grasland. Deze worden allen verschillend geparameteriseerd om realistische evaporatie en transpiratie te simuleren. Voor stedelijk gebied bijvoorbeeld is de transpiratie uitgeschakeld en vindt verdamping alleen plaats via de bodem. Daarnaast zijn de drainage weerstanden relatief klein gemaakt zodat neerslag snel tot afvoer komt. Voor openwater geldt dat de actuele verdamping gelijk is aan de potentiële verdamping. De overige klassen variëren in lengte van het groeiseizoen, worteldiepte, ontwikkeling om een juiste verdeling tussen evaporatie en transpiratie in de tijd te krijgen. Voor toekomstige toepassingen om deze parameterisatie verder te analyseren.

Om de effecten van rivierwaterstanden op kwel en wegzijgingsprocessen in de polder is gebruik gemaakt van de methodiek ontwikkeld door Van Heerwaarden et al. (2005). Deze methodiek gaat ervan uit dat het transport van water beschreven kan worden aan de hand van de wet van Darcy. De dijken zijn ondoorlatend verondersteld, dus de aquifer is het enige transportmedium voor het water en het water kan de aquifer alleen verlaten door via de deklaag naar het oppervlaktewatersysteem te kwellen. Volgens de veronderstelling van Dupuit is transport door een aquifer horizontaal, waardoor het systeem met behulp van de wet van Darcy kan worden beschreven in een ééndimensionale differentiaalvergelijking. Door het invullen van de juiste randvoorwaarden in de oplossing (Mazure, 1936) van deze vergelijking blijft een eenvoudige exponentiële functie over. Deze formule kan worden omgeschreven naar een formule voor de fluxdichtheid van de kwel:

$$q_{kwel}(x) = \frac{H(x) - H_{polder}}{c} = \frac{H_0 - H_{polder}}{c} \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}}$$

kD	Doorlaatvermogen aquifer	[m^2 d^{-1}]
c	Weerstand deklaag	[d]
H	Stijghoogte	[m]
H_0	Stijghoogte in aquifer recht onder rivier	[m]
H_{polder}	Polderpeil	[m]
x	Afstand tot de dijk	[m]
q	Fluxdichtheid kwel	[m d^{-1}]

Er is dus een lineair verband tussen stijghoogte en kwel en er is een exponentieel verband tussen de hoeveelheid kwel en wegzijging en de afstand van de rivier. Deze verbanden maken het mogelijk om een lineaire functie op te stellen, waarin het stijghoogteverschil vermenigvuldigt met een factor de kwel oplevert. Deze factor is alleen afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer en de afstand van de rivier voor elke willekeurige plek en is dus geldig voor alle stijghoogtes. De factor hoeft dus slechts eenmaal per raster cel berekend te worden. Er blijft nu een zeer eenvoudige formule over waar het verschil tussen de druk in de aquifer en de grondwaterstand van het willekeurige gebied kan worden ingevuld om de kwel te verkrijgen.

$$q_{kwel}(x) = factor(x) \cdot (H_0 - H_{polder})$$

$$factor(x) = \frac{q_{kwel}(x)}{H_0 - H_{polder}} = \frac{1}{c} \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}}$$

De theorie gaat uit van een ééndimensionaal systeem dat het verschil tussen de druk in de aquifer en het polderpeil gebruikt om de kwel te berekenen. Voor het model dat ontwikkeld wordt in deze studie, is het echter van belang om gebruik te maken van de verschillen tussen de rivierstand en de grondwaterstand in de polder. De rivierstanden zijn eenvoudig verkrijgbare data en de grondwaterstanden, die met SWAP berekend worden, zijn de werkelijke peilhoogtes van de polder. Met het tweedimensionale model zijn factoren vastgesteld die gebruik maken van rivierstanden in plaats van de druk in de aquifer onder de rivier. Er is gekeken in hoeverre deze verkregen factoren afwijken van de analytische oplossing. Het grondwatermodel werkt echter ook met polderpeilen en niet met grondwaterstanden. De kwelfactor is niet afhankelijk van de het peilverschil, dus wanneer er met grondwaterstanden in plaats van met oppervlaktewaterpeilen gerekend wordt, dan is de berekende factor nog steeds bruikbaar in SWAP. Voor meer achtergrond informatie wordt verwezen naar Van Heerwaarden et al. (2005).

In SWAP zijn een aantal opties beschikbaar om gewasgroei te modelleren, waarbij de gewasgroei afhankelijk is van een veelheid aan factoren die complex met elkaar samenhangen. De hier toegepaste methode, is gebaseerd op de concepten zoals beschreven door Doorenbos and Kassam (1979), waarbij de aanname is dat de relatieve groei gelijk is aan de verhouding van de actuele over de potentiële verdamping. Dit kan worden aangevuld met een gevoeligheidsfactor die aangeeft dat een plant gedurende bepaalde groeistadia gevoeliger is voor droogte- of natschade dan gedurende andere perioden. Deze aanpak kan mathematisch worden weergegeven als:

$$1-\frac{Y_{act}}{Y_{pot}}=K_y\left(1-\frac{ET_{act}}{ET_{pot}}\right)$$

met Y_{act} : actuele opbrengst (kg ha^{-1})
Y_{pot} : potentiële opbrengst (kg ha^{-1})
K_y : gevoeligheidconstante (-)
ET_{act} : actuele evapotranspiratie (mm)
ET_{pot} : potentiële evapotranspiratie (mm)

Een verdere beschrijving van het SWAP model kan worden gevonden in diverse andere rapporten, publicaties en websites (http://www.swap.alterra.nl). De FutureView methode is in het verleden toegepast in de polder Quarles van Ufford. In deze studie werd per peilgebied een SWAP model gebouwd en was er een module ontwikkeld die het mogelijk maakt de effecten van rivierwaterstanden op de kwel en wegzijging in de polder ruimtelijk te kwantificeren (Heerwaarden et al., 2005). In deze studie wordt de volgende stap genomen en wordt er niet per peilgebied een SWAP model gebouwd, maar wordt het gebied ingedeeld in rastercellen van 250 bij 250 meter. Op deze manier worden er bijna 1900 SWAP modellen opgezet. Het systeem is flexibel opgebouwd en kan ook met elke andere willekeurige celgrootte worden opgezet. Alle invoer en uitvoer wordt direct gekoppeld aan een database en GIS zodat presentatie en analyse gebruikersvriendelijk zijn.

2.2 *Parameterisatie model gegevens*

Voor elke rastercel zijn de gegevens nodig om een SWAP simulatie voor deze cel te kunnen runnen. Bestaande kaarten worden geïnterpoleerd naar rastercellen om de benodigde gegevens te verkrijgen. Nominale gegevens, zoals landgebruik, krijgen per cel de waarde die het meeste voorkomt binnen het gebied. Gegevens met een getalswaarde worden gemiddeld, tenzij anders is vermeld. De benodigde gegevens worden verkregen op de volgende manier:

- Zomer- en winterpeil van het oppervlaktewater. Afkomstig uit de peilgebieden aangeleverd door het waterschap.

- Fysische eigenschappen van de bodem. Deze worden bepaald met de Staringreeks (Wösten et al., 2001), gebruikmakend van de textuurgegevens behorende tot het bodemtype van het gebied afkomstig uit de bodemkaart.

- Ruimtelijke drainage gegevens uit de STONE-database (Kroon et al., 2001). Deze database bevat de drainageweerstanden en de slootdichtheden voor het primaire en secundaire drainagesysteem en de aanwezigheid en de gemiddelde diepte van het buisdrainagesysteem in cellen van 250 x 250 m. Slootdichtheden worden omgerekend naar een gemiddelde slootafstand met onderstaande formule:

$$L=\frac{250^2}{D} \qquad (3.10)$$

Termen:

L	Gemiddelde slootafstand	[m]
D	Aantal meter sloot per cel	[m]

De weerstanden worden gemiddeld volgens het geometrische gemiddelde, gegeven in onderstaande formule:

$$\overline{\ln(c)} = \frac{1}{A}\int_A \ln(c)\cdot dA \qquad (3.11)$$

Termen:

c	Weerstand drainagesysteem	[d]
A	Oppervlakte cel	[m^2]

- Infiltratie vanuit het oppervlaktewater systeem kan optreden als de peilen in het primaire en secundaire ontwateringsysteem lager hoger zijn dan de grondwaterstanden in het aangrenzende gebied.

- Maaiveldhoogte ten opzichte van NAP. Deze hoogte is afgeleid uit het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland). Per rastercel wordt de gemiddelde maaiveldhoogte bepaald op basis van het originele AHN.

- Tussen de kwelintensiteit per meter stijghoogteverschil, de eigenschappen van de aquifer en de deklaag en de afstand tot de rivier bestaat een verband (Van Heerwaarden et al., 2005). De afstand tot de rivier die de gemiddelde kwel per meter stijghoogteverschil weergeeft, wordt bepaald met onderstaande formule:

$$\bar{x} = \frac{\int_A x\cdot factor(x)dA}{\int_A factor(x)dA} \qquad (3.12)$$

Termen:

x	Afstand tot de rivier	[m]
$factor(x)$	Constante afhankelijk van deklaag, de aquifer en de afstand tot de rivier	[-]
A	Oppervlakte cel	[m^2]

Per cel worden er vier afstanden voor de locatie van de gemiddelde kwel gedefinieerd:
  - afstand tot de Waal bij hoogwater (afstand tot de winterdijk)
  - afstand tot de Waal bij laagwater (afstand tot het zomerbed)
  - afstand tot de Maas bij hoogwater (afstand tot de winterdijk)
  - afstand tot de Maas bij laagwater (afstand tot het zomerbed).

Het is hoogwater als het waterpeil in de rivier boven de hoogte van de uiterwaarden uitstijgt. Deze hoogte is per cel vastgesteld met behulp van het AHN (AHN, 2005).

- Fractie zandbanen in het gebied. Dit getal geeft aan welk deel van de oppervlakte van de rastercel bestaat uit zandbanen. Uit diverse analyses met het tweedimensionale grondwatermodel is gebleken dat de aanwezigheid van zandbanen de kwelintensiteit met een factor 10 verhoogt. De kwelfactor wordt daarom aangepast aan de fractie zandbanen:

$$factor = f \cdot 10 \cdot factor + (1 - f) \cdot factor \quad (3.13)$$

Termen:

$factor$	Kwelfactor	[-]
f	Fractie zandbanen in de rastercel	[-]

- Landgebruik. Het landgebruik is gebaseerd op de waarden uit de LGN4 (LandGebruik Nederland) kaart. Het landgebruik heeft invloed op de verdamping. Binnen deze studie maken wij gebruik van de volgende typen landgebruik:
  - Grasland
  - Akkerland
  - Stedelijke bebouwing
  - Bos
  - Open water

- Correctiewaarde rivierhoogte. De reeksen met gemeten rivierhoogtes die voor alle deelgebieden gebruikt worden zijn meetwaarden van één punt (Tiel voor de Waal en Grave-Beneden voor de Maas). Om per deelgebied de werkelijke rivierhoogte te weten moeten de rivierhoogtes gecorrigeerd worden voor verval. Per gebied is de gemiddelde afstand tot Tiel en Grave-Beneden bepaald, gemeten door het midden van de rivier. Met behulp van deze afstand worden voor elke cel de werkelijke rivierhoogtes berekend.

  Met behulp van het gemiddelde peil in Nijmegen is voor elke cel langs de Waal een correctiewaarde vastgesteld met de volgende formule:

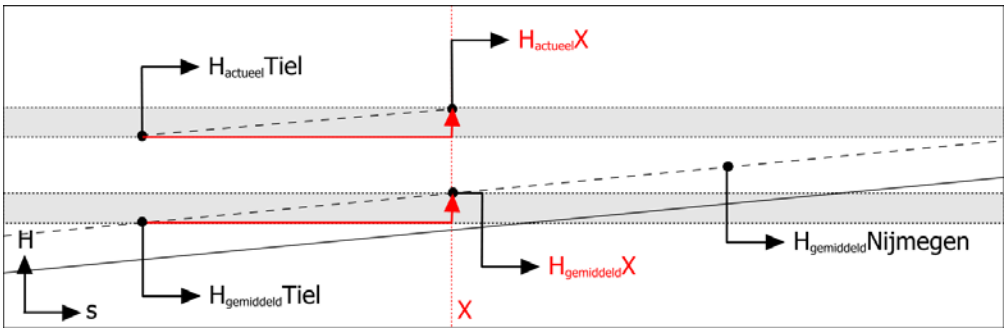
$$CorWaal = \frac{s}{S}\left(H_{Nijmegen} - H_{Tiel}\right) \quad (3.14)$$

  Termen:

$CorWaal$	Correctie voor het rivierpeil van de Waal	[m]
s	Afstand vanaf Tiel in de richting van Nijmegen	[m]
S	Totale afstand tussen Nijmegen en Tiel	[m]
H_x	Rivierpeil bij gemiddelde afvoer op locatie x	[m]

  Deze correctiewaarde moet worden opgeteld bij de waarden uit de meetreeks van Tiel om zo de reeks voor de cel in kwestie te krijgen.

  Figuur 2 laat zien hoe de rivierhoogtecorrectie werkt. De rivierhoogte bij gemiddelde afvoer langs cel X wordt bepaald aan de hand van de rivierhoogtes bij gemiddelde afvoer van Nijmegen en Tiel. Het verschil tussen de hoogte bij gemiddelde afvoer langs cel X en de hoogte bij gemiddelde afvoer in Tiel (het grijze gebied in Figuur 2) wordt opgeteld bij de actuele hoogte in Tiel om de actuele rivierhoogte langs cel X te krijgen.



Figuur 2. Schematische weergave van rivierhoogtecorrectie.

Voor de Maas is een soortgelijke procedure uitgevoerd voor de hoogwatersituatie met behulp van de rivierstanden bij Lith-Boven en Grave-Beneden.

$$CorMaas = \frac{s}{S}\left(H_{Grave-Beneden} - H_{Lith-Boven}\right) \tag{3.15}$$

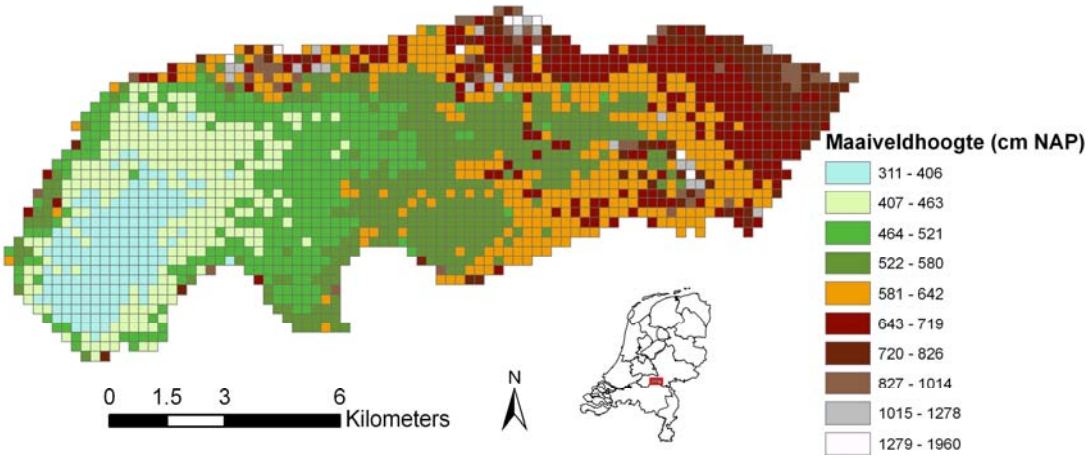
Termen:

$CorMaas$	Correctie voor het rivierpeil van de Maas	[m]
s	Afstand vanaf Grave-Beneden in de richting van Lith-Boven	[m]
S	Totale afstand tussen Grave-Beneden en Lith-Boven	[m]
H_x	Rivierpeil bij bekende hoge afvoer op locatie x	[m]

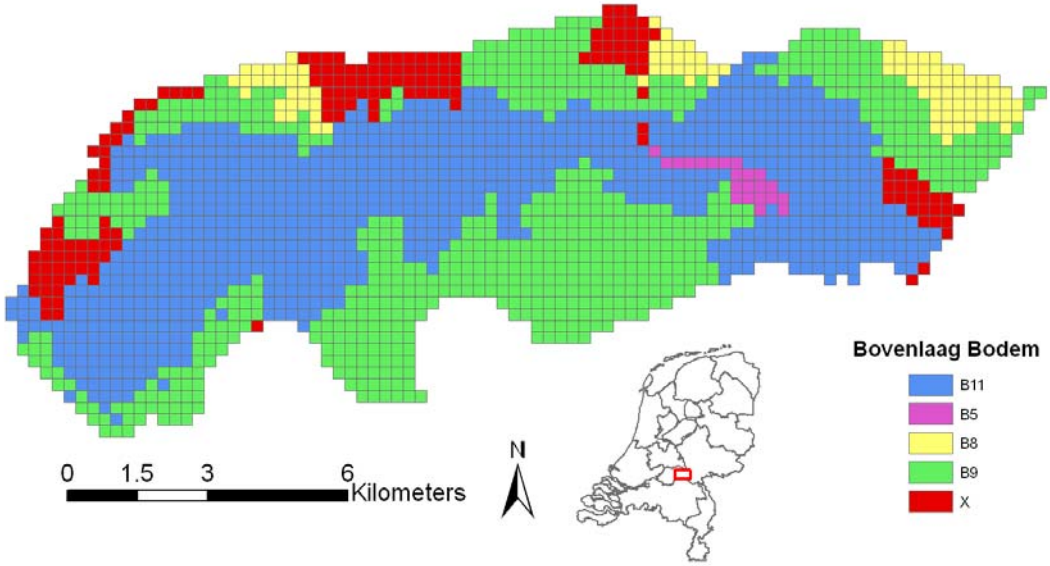
Tijdens een gemiddelde afvoer in de Maas is het peil constant en gelijk aan het stuwpeil dat bij dat deel van de Maas hoort. Daarom wordt bij deze correctie geen gebruik gemaakt van de rivierhoogte bij gemiddelde afvoer, maar van de rivierhoogte bij een bekende hoge afvoer waarbij de stuwen niet meer van invloed zijn.

2.3 *FutureViewR invoer*

Hieronder staan enkele voorbeelden die het detailniveau van FutureViewR weergeven. In onderstaande figuur is de gemiddelde maaiveldhoogte per raster cel weergegeven. Er is een gradiënt van oost naar west in maaiveldhoogte en een totaal verval van ongeveer 5 meter. Dit is ook de dominante afwateringsrichting.



Figuur 3. Hoogteligging op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland

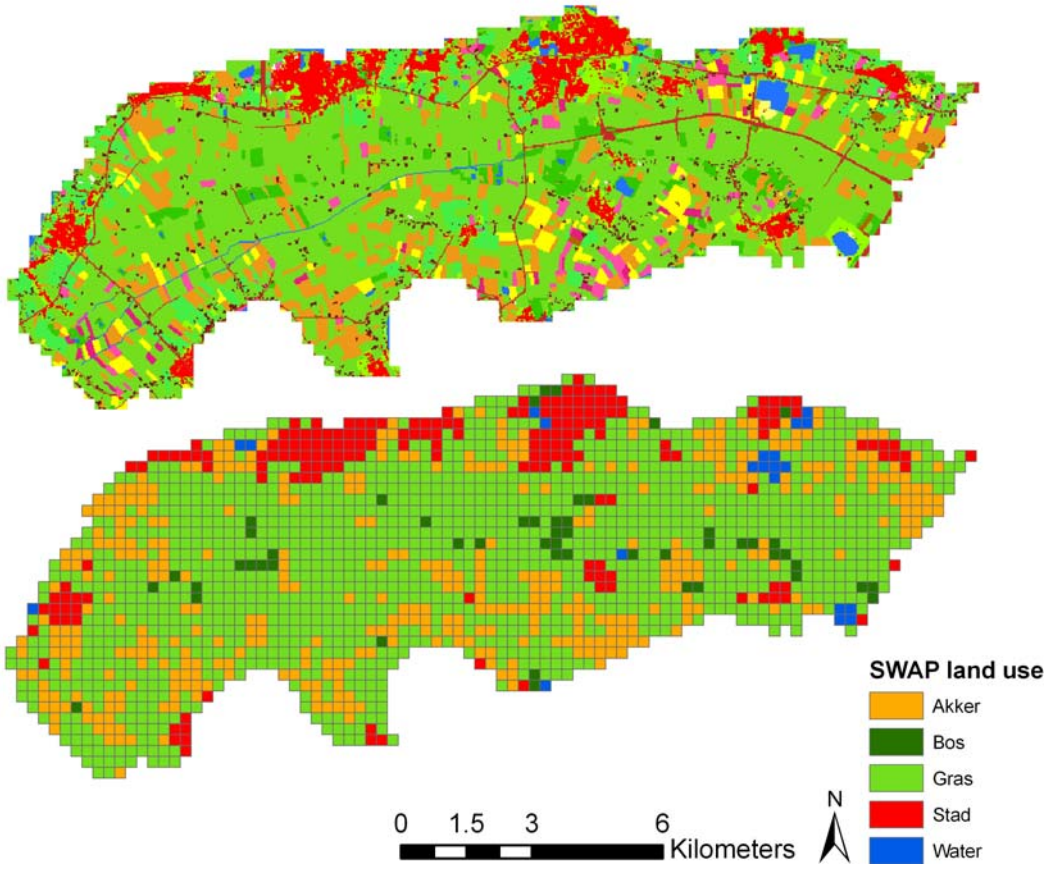


Figuur 4. Bodemfysische klasse van de toplaag van de bodem op basis van Wösten et al. (2001)

Essentieel voor het bepalen van de hoeveelheid water die kan worden vastgehouden zijn de bodemeigenschappen. De meest betrouwbare bron van informatie hiervoor is de STIBOKA 1:50.000 bodemkaart. De oorspronkelijke bodemkaart van STIBOKA bevat 760 subgebieden en 167 verschillende bodemeenheden. De STIBOKA kaart bevat alleen kwalitatieve eigenschappen, terwijl voor de FutureView benadering juist kwantitatieve eigenschappen nodig zijn: de zogenaamde bodemfysische eigenschappen (retentie- en doorlatendheidskarakteristieken).

De volgende stap die moet worden uitgevoerd na deze generalisatie is het omzetten van de kwalitatieve bodemeigenschappen naar de bodemfysische karakteristieken. In de loop der jaren zijn hiervoor technieken ontwikkeld: pedo-transferfuncties. De meest toegepaste is de zogenaamde Staringreeks, waarvan de nieuwste versie hier gebruikt is (Wösten et al., 2001). De uiteindelijke bodemkaart die gebruikt wordt is gebaseerd op een conversietabel die is samengesteld door de

bodemeenheden te vertalen naar de 18 bovengronden en 19 ondergronden volgens Wösten et al. (2001). De uiteindelijke bodemkaart (alleen de bovenlaag) die gebruikt is voor verdere analyse is weergegeven als Figuur 4.



Figuur 5. Landgebruik in Quarles van Ufford.

Het landgebruik is gebaseerd op het LGN4[1]. De klassen uit het LGN bestand zijn voor deze verkennende studie gegroepeerd tot een vijftal hoofdklassen (Akker, Bos, Gras, Stad en Water). Voor elk van deze klassen is een SWAP gewas gedefinieerd. Vervolgens is per raster cel het dominante landgebruik bepaald en deze is toegekend. Het landgebruik (originele en geaggregeerd) is weergegeven in Figuur 5.

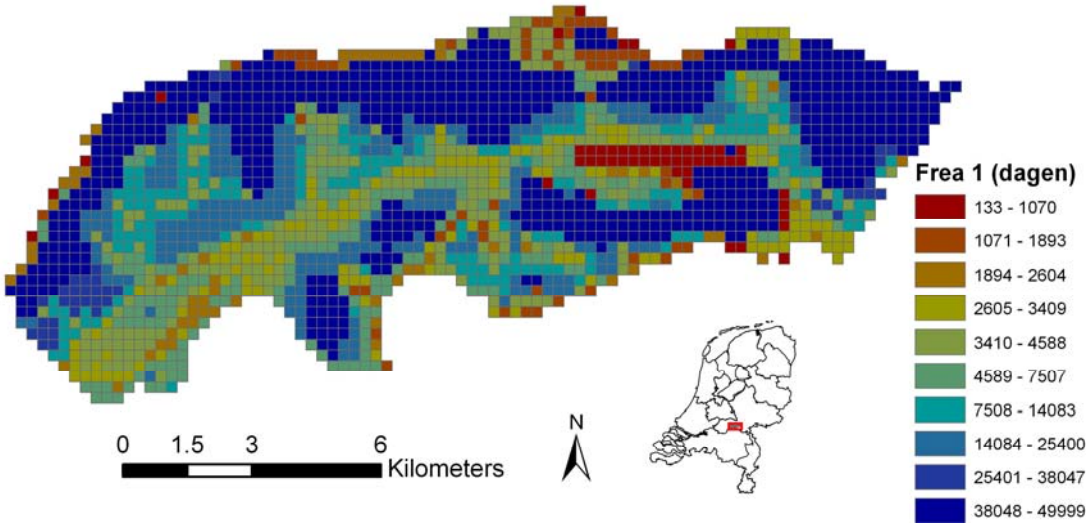
Er wordt onderscheid gemaakt tussen een primair, secundair en tertiair drainage systeem (zie Tabel 1)

Tabel 1. De drie drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.

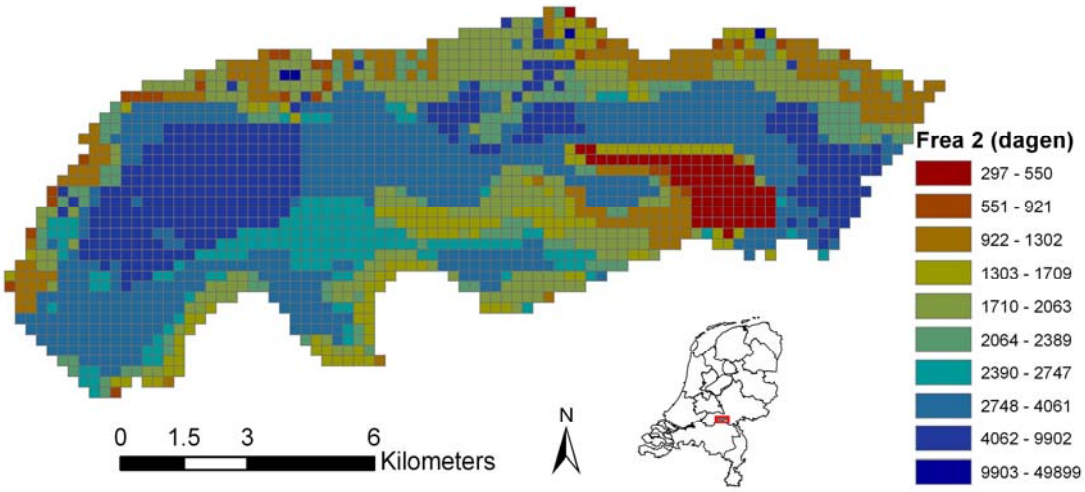
Drainagesysteem	Betekenis
Primair	Waterlopen 3 - 6 meter en waterlopen breder dan 6 meter
Secundair	Waterlopen smaller dan 3 meter

[1] http://www.lgn.nl

De drainage weerstanden van elk van deze systemen zijn invoer in het FutureViewR model. De STONE database (Kroon et al., 2001) is hiervoor gebruikt. Figuur 6 en Figuur 7 geven de drainage weerstanden weer voor het primaire en secundaire drainage systeem. Het grootste deel van de drainage gaat via het secundaire drainage systeem en de kleigronden in het centrale deel van de polder hebben de hoogste weerstanden.

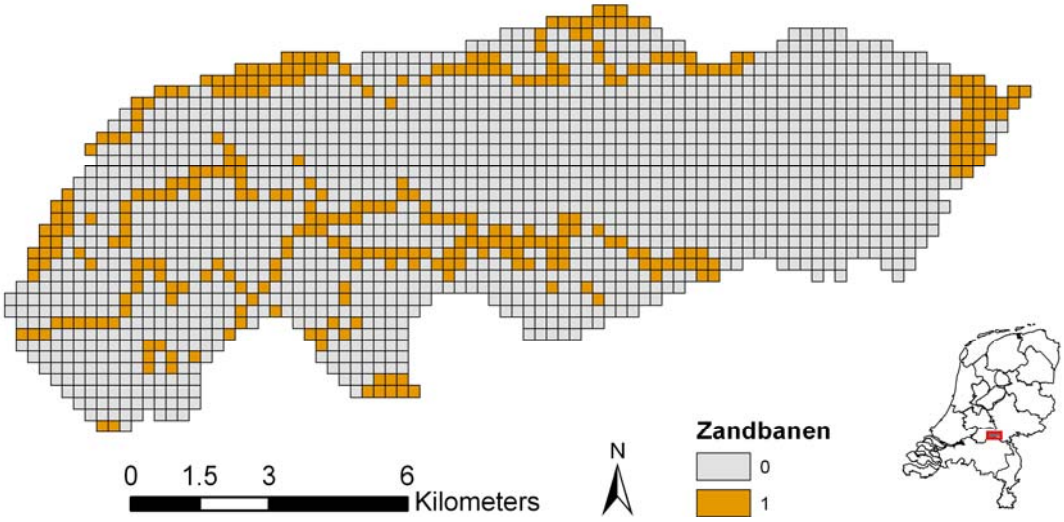


Figuur 6. Weerstand voor het primaire drainage niveau



Figuur 7. Weerstand voor het secundaire drainage niveau

Een aspect waarbij de ruimtelijke detaillering een grote rol speelt is de aanwezigheid van zandbanen. Deze zandbanen bepalen voor een groot deel de kwel en wegzijgings karateristieken van het gebied. Door de zandbanen kaart te combineren met de rastercellen kan de fractie zandbaan per rastercel bepaald worden. Als deze factie groter is dan 0.5 wordt een rastercel als zandbaan aangemerkt. Voor de toekomst heeft het waterschap aangegeven een lager criterium te willen hanteren, vanwege het grote effect van de zandbanen op de kwel inde polder. Dit is weergegeven in Figuur 8. Tussen de rastercellen is er geen horizontaal transport van water mogelijk.



Figuur 8. Aanwezigheid van zandbanen

3 Implementatie oppervlaktewater

Naast de uitbreiding naar het FutureViewR model waardoor een veel groter ruimtelijk detail niveau mogelijk is, is er ook een oppervlaktewater module ontwikkeld.

De basis voor het oppervlakte water model wordt gevormd door de RAM gebieden. De RAM gebieden zijn een verdere detaillering van de peilvakken. Per RAM gebied wordt een representatieve waterloop (RW) verondersteld welke afwatert door middel van een stuwkromme. Afvoeren over stuwen worden in de praktijk berekend aan de hand van de volgende formule voor rechthoekige lange overlaten (Cultuurtechnische Vereniging, 1988).

$$Q = 1.7 \cdot \mu \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \tag{3.1}$$

Termen:

Q	Debiet	[$m^3s^{-1}ha^{-1}$]
μ	Stuwconstante	[-]
b	Stuwkruinbreedte	[m]
h	Overstorthoogte	[m]

Er wordt vanuit gegaan dat de stuwen in het gebied zijn gedimensioneerd op een maatgevende afvoer van 1.5 l s^{-1} ha^{-1} en een afvoercapaciteit van de stuw van de halve maatgevende afvoer. Een maatgevende afvoer wordt 1 à 2 dagen per jaar overschreden en de halve maatgevende afvoer wordt 10 à 20 dagen per jaar overschreden. De stuwbreedte van de representatieve waterloop kan worden bepaald uit de oppervlakte van het peilgebied, de halve maatgevende afvoer ($Q_{0.5m}$) en een constant veronderstelde overstorthoogte bij deze afvoer (h_0). Nu geldt de volgende vergelijking voor de afvoer per hectare:

$$Q_{0.5m} = 1.7 \cdot \mu \cdot b \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \tag{3.2}$$

Herschrijven leidt tot de volgende relatie tussen de stuwbreedte en het oppervlakte (A [ha]) van het peilgebied:

$$b = \frac{Q_{0.5m}}{1.7 \cdot \mu \cdot h_0^{\frac{3}{2}}} \cdot A \tag{3.3}$$

De stuwconstante wordt in deze studie gelijk gesteld aan 1.1 en h_0 wordt gelijk gesteld aan 0.20 m. Deze stuwbreedte wordt gebruikt in de berekening van de werkelijke afvoeren over de stuw.

De totale oppervlakte aan open water in het peilgebied kan worden berekend aan de hand van de sloot dichtheden en breedtes van het primaire en secundaire drainage systeem volgens de volgende formule:

$$A_w = \frac{A \cdot b1}{d1} + \frac{A \cdot b2}{d2} \tag{3.4}$$

Termen: (3.5)

A_w	Oppervlakte open water	[m^2]
$b1$	Gemiddelde breedte sloot primaire drainage systeem	[m]
$d1$	Slootafstand primaire drainage system	[m]
$b2$	Gemiddelde breedte sloot secundaire drainage systeem	[m]
$d2$	Slootafstand secundaire drainage system	[m]

Uit de SWAP simulatie volgen op dagbasis de fluxen van (infiltratie) en naar (drainage) naar het open water systeem vanuit de bodemkolommen. Daarnaast zijn de hoeveelheden neerslag, verdamping en kwel en wegzijging voor het open water bekend. Per dag kan nu een totale netto hoeveelheid (Q_{net}[m^3/dag]) worden vastgesteld dat in de RW terecht komt of er uit verwijderd wordt.

Deze Q_{net} leidt tot een verandering van de overstort hoogte op dag n:

$$h_n = \frac{Q_{net,n}}{A_w} \tag{3.6}$$

Termen:

h_n	Verschil in overstorthoogte	[m]

Met behulp van de stuwkromme wordt nu de bijbehorende afvoer over de stuw (Q_n) berekend op dag n.

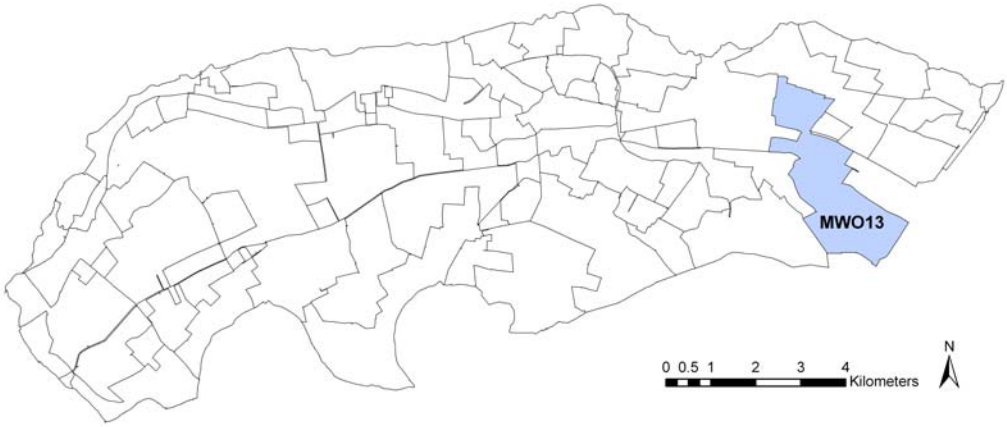
$$Q_n = 1.7 \cdot \mu \cdot b \cdot h_n^{\frac{3}{2}} \tag{3.7}$$

Nu kan de nieuwe overstorthoogte voor dag n+1 (h_{n+1}) bepaald worden aan de hand van

$$h_{n+1} = h_n + \frac{Q_{net,n+1} - Q_n}{A_w} \tag{3.8}$$

Op deze manier wordt de gehele tijdreeks doorgerekend. Het is duidelijk dat de berekende afvoeren sterk afhankelijk zijn van A_w.

Bovenstaande methodiek wordt toegelicht aan de hand van een simulatie van peilgebied MWO13 van 1/1/2002 tot en met 31/12/2003 (Figuur 9)



Figuur 9: Locatie peilgebied MWO13

De karakteristieken van MWO13 zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Karakteristieken MWO13

Naam	MWO13
A ($m^{2)}$	5151696
d1 (m)	868
d2 (m)	117
b1 (m)	5
b2 (m)	2
Zomerpeil (m -mv)	1.47
Winterpeil (m -mv)	1.72

Op basis van deze karakteristieken kan de breedte van de stuw worden bepaald voor de MWO13 RW volgens formule 3.3. Er wordt aangenomen dat h_o gelijk is aan 0.20 m en μ gelijk is aan 1.1. Er geldt nu dus dat:

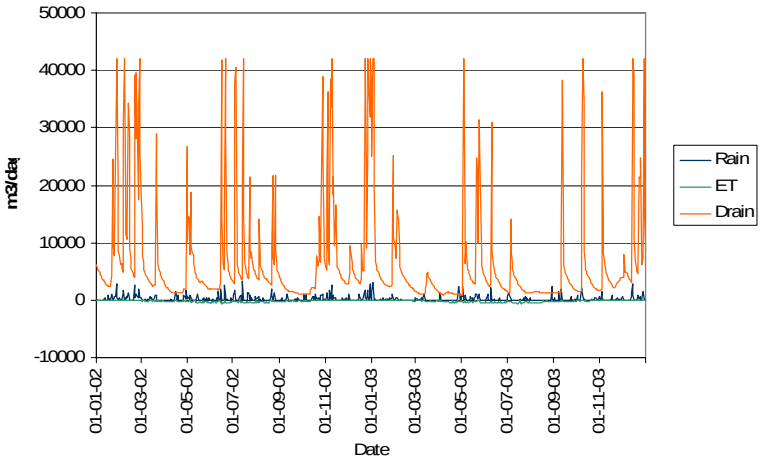
$$b = \frac{0.00075}{1.7 \cdot 1.1 \cdot 0.20^{\frac{3}{2}}} \cdot 515.17 = 2.31 \qquad (3.8)$$

Bij dit oppervlakte en deze breedte is de maatgevende afvoer gelijk aan 0.39 m^3s^{-1}. Met behulp van formule 3.4 kan nu het oppervlakte aan open water worden bepaald:

$$A_w = \frac{5151696 \cdot 5}{868} + \frac{5152696 \cdot 2}{117} = 117541\,\text{m}^2 \quad (3.4)$$

Dit komt overeen met 2.3% van de totale oppervlakte van het peilgebied.

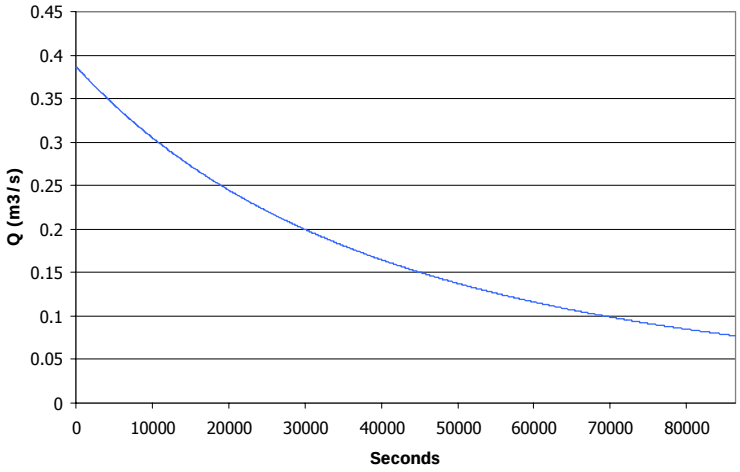
Figuur 10 geeft de fluxen in m^3/dag weer naar de representatieve waterloop. De resultante van deze fluxen moet in principe worden afgevoerd aannemend dat er gemiddelde over twee jaar een te verwaarlozen verandering in berging in het oppervlaktewater is. Ten opzichte van de drainagefluxen uit de SWAT kolommen zijn de bijdragen van neerslag in het openwater (5.9%) en verdamping (3%) gering. Er is geen kwel in MWO13.



Figuur 10: Fluxen naar de representatieve waterloop MWO13.

Nu de breedte van de stuw bekend is, het oppervlakte aan open water en de netto fluxen bekend zijn kunnen de dagelijkse afvoeren over de stuw iteratief berekend worden aan de hand van de vergelijking 3.6 tot 3.8.

De op deze manier berekende afvoer gaat er echter vanuit dat de overstorthoogte gedurende de dag constant blijft. In de praktijk is dit niet zo en dus wordt de afvoer overschat.



Figuur 11: Verloop van de afvoer gedurende een dag. Op t=0 is de afvoer gelijk aan de maatgevende afvoer.

Dit wordt duidelijk aan de hand van Figuur 11. Hier is de afname van de afvoer weergegeven in de tijd gedurende één gehele dag (86400 seconde). De afvoer neemt in dit specifieke voorbeeld gedurende een dag af van 0.39 m3/s tot 0.08 m3/s. Om dit probleem op te lossen wordt de initieel berekende afvoer te vermenigvuldigen met een correctie factor tussen 0 en 1. Deze correctie factor wordt bepaald door de volgende differentiaal vergelijking op te lossen:

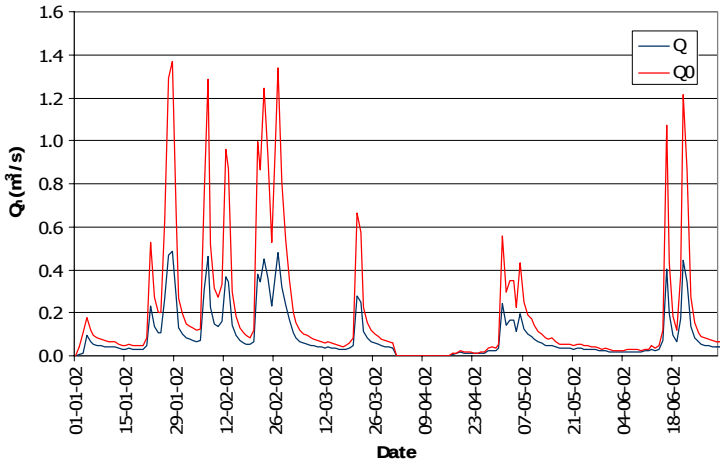
$$Q = A_w \frac{dh}{dt} = 1.7 \cdot \mu \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \tag{3.5}$$

Waarbij als randvoorwaarde wordt aangenomen dat h(0) = h_0 (de overstorthoogte aan het begin van de dag). De correctiefactor wordt nu gegeven door:

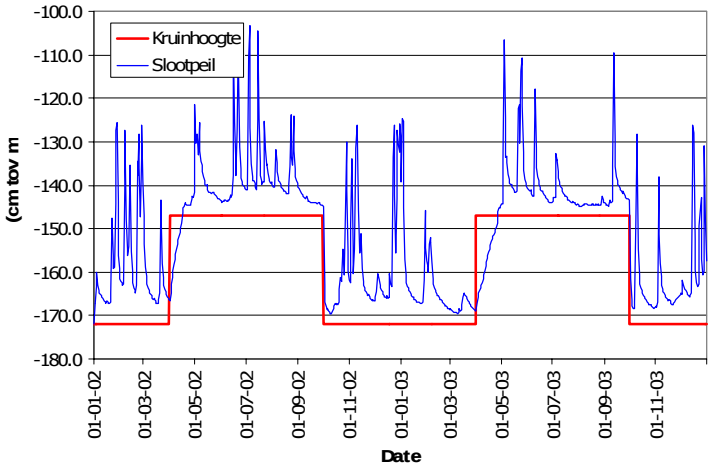
$$cor = \frac{A_w(4 \cdot A_w + 1.7 \cdot b \cdot \sqrt{h_0} \cdot \mu \cdot 86400)}{(2 \cdot A_w + 1.7 \cdot b \cdot \sqrt{h_0} \cdot \mu \cdot 86400)^2} \tag{3.6}$$

De uiteindelijke afvoeren over de stuw en de kruinhoogte en berekende slootpeilen zijn weergegeven in Figuur 12 en Figuur 13. Uit de controle van de waterbalans blijkt dat er gemiddeld per jaar 299.8 mm wordt afgevoerd terwijl de som van drainage, neerslag en verdamping gelijk is aan 300.4 mm/jaar. De waterbalans is dus nagenoeg sluitend en dat schept vertouwen in de opgezette methodiek.

Verdere kalibratie kan worden bewerkstelligd door het natte oppervlakte en de stuw dimensionering aan te passen.



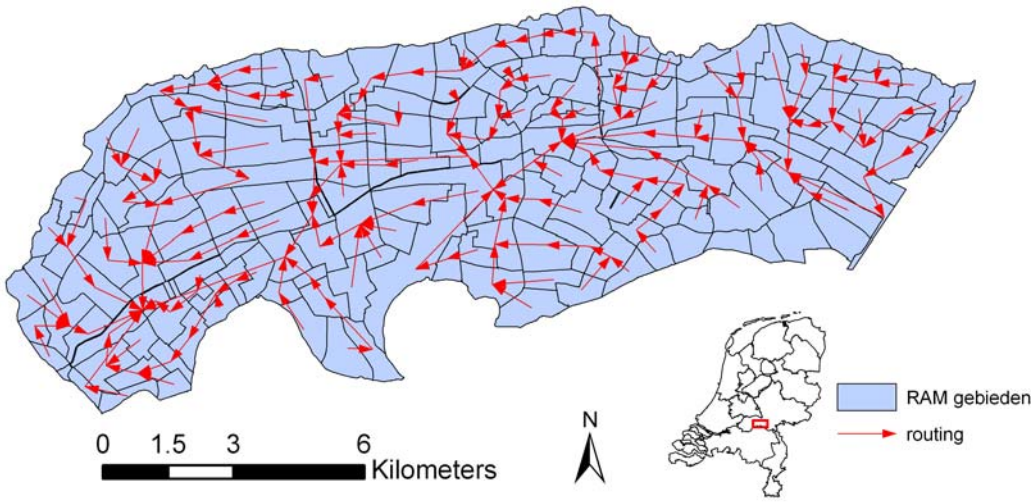
Figuur 12: Berekende afvoeren na toepassing correctie factor over de representatieve stuw. Q_0 is de afvoer bij een verkeerde tijdintegratie. Q is de gecorrigeerde afvoer (waterloop MWO13)



Figuur 13: Kruinhoogte stuw en berekende peilen (waterloop MWO13)

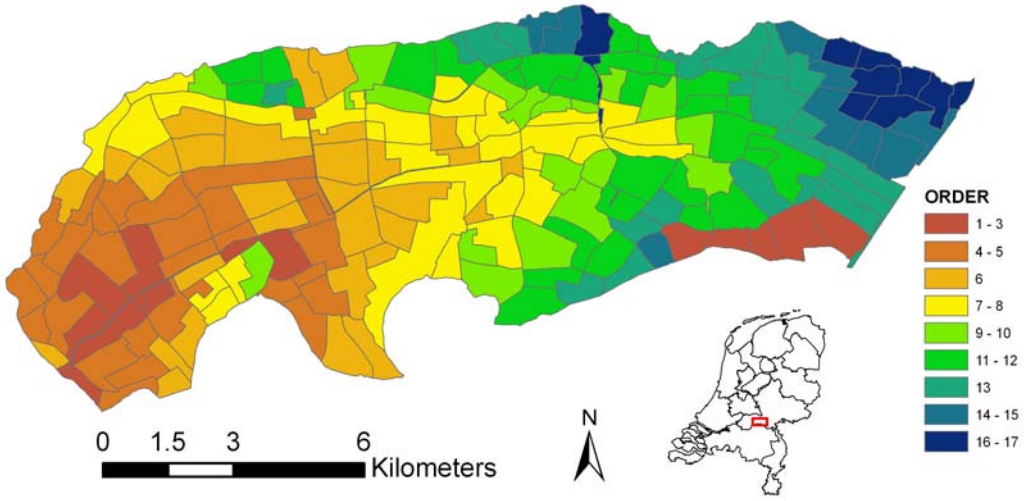
4 Koppeling FutureViewR en oppervlaktewater model

Voor de oppervlakte water schematisatie is gebruik gemaakt van de Regen Afvoer Model (RAM) schematisatie die door het Waterschap is gemaakt. De RAM schematisatie verdeelt peilgebieden onder in kleinere gebieden en ook de onderlinge samenhang en de relatie met het oppervlakte water systeem is vastgelegd. In de polder zijn in totaal 190 RAM gebieden en voor elk RAM gebied wordt een RW verondersteld. Van elk RAM gebied is bekend waar deze op afwatert. De RAM gebieden en de schematische afwatering zijn weergegeven in Figuur 14.



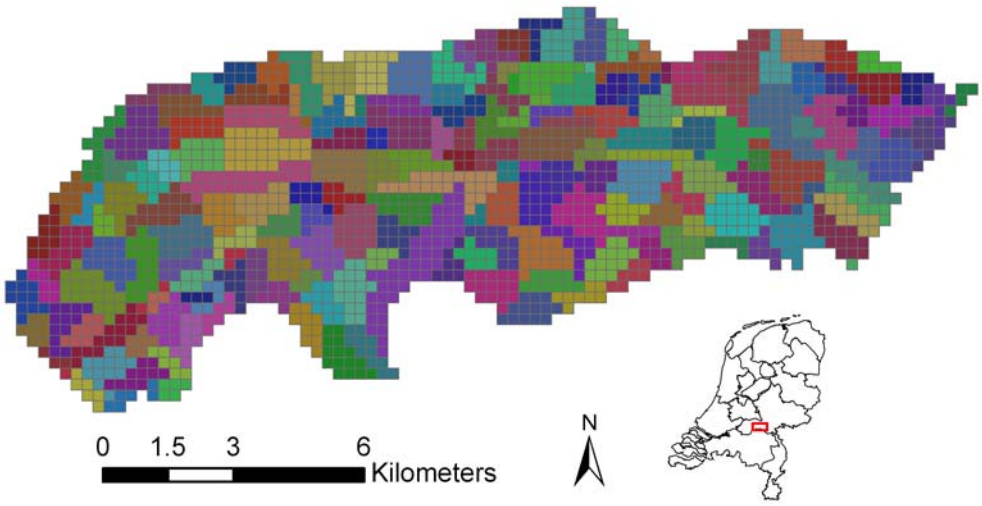
Figuur 14: RAM gebieden en schematische afwatering

Vervolgens is vanaf stroomafwaarts naar stroomopwaarts de orde bepaald van elk RAM gebied. Deze orde legt vast in welke volgorde de FutureView raster cellen moeten worden doorgerekend. Het meest benedenstroomse RAM gebied heeft orde 1, de RAM gebieden die op dit RAM gebied afwateren hebben orde 2, etc. De orde van de RAM gebieden is weergegeven in Figuur 15. Op dit moment kan er één dominante stroomrichting worden gespecificeerd die zowel voor de wateraanvoer als voor de waterafvoer situatie geldt. Wateraanvoer kan met het instrument eenvoudig worden gesimuleerd. Per RW kan wateraanvoer worden gespecificeerd. Dit kan per individuele RW of door de wateraanvoer op een bovenstroomse locatie te specificeren. Het water wat wordt aangevoerd wordt via het oppervlakte watersysteem door getransporteerd. Als er ten gevolge van lage grondwaterstanden een hoge vochttekort in de bodem is zal het water infiltreren vanuit het oppervlaktewater systeem.



Figuur 15: Orde van de RAM gebieden

Vervolgens zijn de FutureView raster cellen toegekend aan de RAM gebieden. Eerst worden alle rasters met de hoogste orde doorgerekend, daarna wordt de oppervlakte water simulatie voor de desbetreffende RWs uitgevoerd en dit wordt herhaald totdat de laagste orde bereikt is. De toekenning van de raster cellen aan de RAM gebieden zijn weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16: Toekenning rastercellen aan RAM gebieden

5 Technische implementatie

Het gehele model wordt aangestuurd door de in Visual Basic (Visual Basic .NET) ontwikkelde schil FutureView. FutureView doorloopt de volgende stappen:

- De resultaten worden uit een centrale database ingelezen.
- Het SWAP model (versie 3.0) wordt voor elke rastercel gerund
- De kwel/wegzijgings module wordt voor elke rastercel gerund.
- De resultaten worden weggeschreven naar de database,
- De invoergegevens van de open water module worden vanuit de database ingelezen.
- Deze gegevens worden samen met resultaten van de SWAP runs gebruikt om de open water module te runnen en de resultaten worden weer weggeschreven naar de database.

Het simuleren van 1900 SWAP kolommen voor een periode van 10 jaar neemt enkele uren in beslag. De oppervlaktewater module kost op dit moment enkele dagen, maar dat wordt nog verder geoptimaliseerd.

Er is gekozen voor de Microsoft SQL Server 2005 (Express Edition) als relationeel database management systeem (RDMS). Deze database management software is gratis te verkrijgen en verdient qua snelheid en omgaan met grote hoeveelheden gegevens grote voorkeur boven bijvoorbeeld Microsoft Access.

Om de invoergegevens aan de database te onttrekken en de resultaten weg te schrijven wordt gebruikt gemaakt van de Structured Query Language (SQL). SQL is een standaard computer taal die veelvuldig wordt gebruikt om gegevens te creëren, wijzigen, onttrekken en manipuleren uit een RDMS. Transact-SQL, ook wel T-SQL genoemd, is een Microsoft uitbreiding op SQL special gericht op toepassing met SQLServer. T-SQL wordt gebruikt in FutureView voor het wegschrijven en ontrekken van gegevens aan de database.

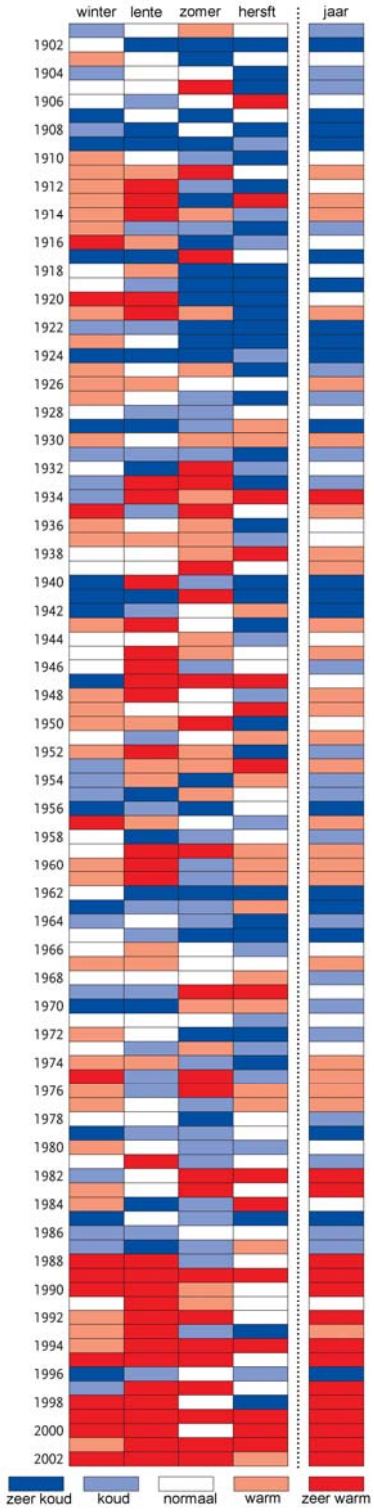
Een groot voordeel van deze benadering is dat er een directe koppeling kan worden gelegd met ArcGIS software. Vanuit ArcGIS, of andere GIS pakket, kan de database direct wordt benaderd en kunnen de modelresultaten of invoer ruimtelijk geanalyseerd en gevisualiseerd.

De database en het modelinstrumentarium zijn relatief eenvoudig te installeren op een PC met besturing systeem Windows XP en een minimaal RAM geheugen van 512 MB. Ook moet er voldoende harde schijf ruimte beschikbaar zijn.

6 Verandering hydrologie ten gevolge van Klimaatverandering

6.1 *Methode*

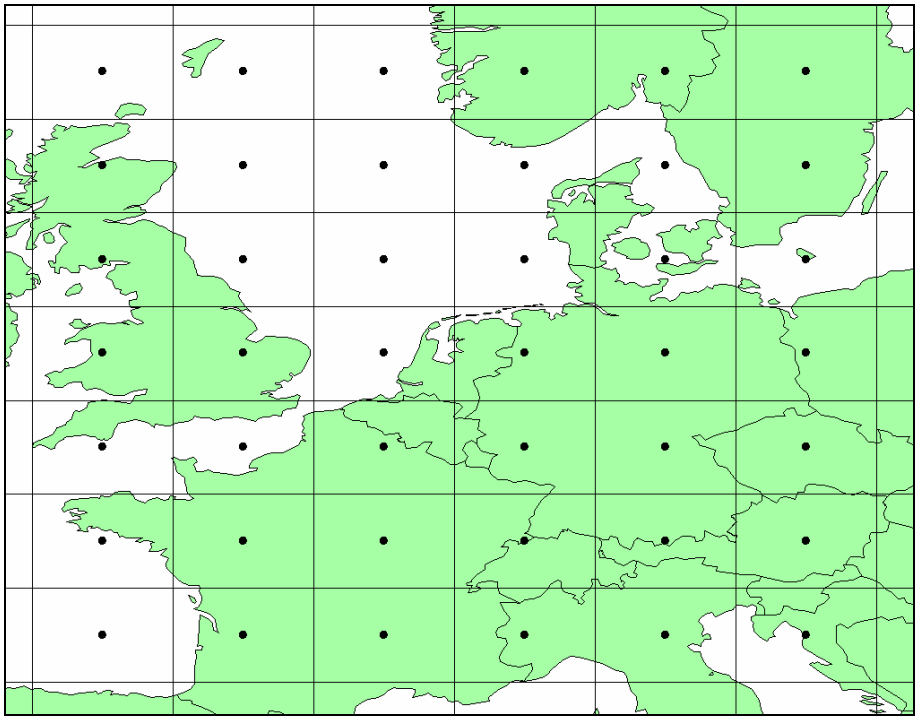
Uitstoot van broeikasgassen, zoals CO_2, hebben geleid tot een versterkt broeikaseffect, waardoor de aarde opwarmt. Er bestaat geen twijfel meer dat ons klimaat in de afgelopen honderd jaar is veranderd (Oreskes, 2004). De zes warmste jaren sinds de waarnemingen van het KNMI zijn begonnen, hebben alle plaats gevonden in de afgelopen 10 jaar: 1995, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003 (KNMI, 2003)). Bovendien is er een intensivering van de neerslag waargenomen, waarbij zowel de totale neerslag als meer intensievere buien optreden.



Internationaal wordt er veel onderzoek gedaan naar klimaatverandering waarbij waarnemingen en modellen hebben bijgedragen tot een snel groeiend inzicht in processen die het klimaat doen veranderen. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is het meest gezaghebbende orgaan op het gebied van klimaatverandering. Het IPCC inventariseert de wetenschappelijke, technische en sociaal-economische kanten van klimaatverandering, de mogelijke gevolgen en de wijze waarop vermindering van broeikasgas uitstoot en adaptatie strategieën kunnen worden gerealiseerd. Naast een secretariaat in Zwitserland zijn er wereldwijd honderden instituten en tienduizenden mensen die op één of andere manier bij het IPCC betrokken zijn. De belangrijkste uitgaven van de IPCC zijn de zogenaamde "Assessments Reports", die ongeveer elke vijf jaar verschijnen (IPCC, 2001). Het vierde "Assessment Report" verschijnt begin 2007.

Belangrijk in de projecties voor het toekomstige klimaat zijn de klimaatmodellen, die gebruikt worden om projecties voor het toekomstige klimaat te genereren op wereldschaal. Deze klimaatmodellen zijn gebaseerd op fysische processen die beschreven worden door wiskundige vergelijkingen. Deze klimaatmodellen worden vaak aangeduid als GCM, General Circulation Model. Tegenwoordig wordt ook vaak de term AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model) gebruikt, om expliciet te maken dat er een koppeling is tussen oceanografische en atmosferische modelcomponenten.

GCMs berekenen het klimaat op wereldschaal door de hele aarde te verdelen in een driedimensionaal grid. De horizontale resolutie van dit grid is ongeveer 250 km en de verticale 1 km, afhankelijk van het GCM. Met andere woorden alle eigenschappen binnen een gebied van 250 bij 250 km worden geacht constant te zijn! Een illustratie van deze resolutie is te zien in Figuur17, waarbij duidelijk is dat heel Nederland wordt weergegeven door drie homogene gebieden. Interessant is nog dat het westelijke grid-punt dat over Nederland valt door het GCM wordt beschouwd als oceaan.



Figuur17: Grid zoals toegepast voor de berekeningen van de klimaatprojecties door het HadCM3 GCM.

Het KNMI heeft deze mondiale projecties vertaald naar de schaal van Nederland, waarbij als uitgangspunt de globale temperatuurstijging is genomen. De neerslagverwachtingen vanuit de GCMs zijn niet gebruikt voor de verwachtingen in Nederland. In plaats daarvan is de relatie tussen temperatuur en neerslag geëxtrapoleerd (Droogers en van den Hurk, 2004). Het KNMI heeft in 2000 (Kors et al., 2000) en in 2006 (Van den Hurk et al., 2006) klimaatscenario's voor Nederland opgesteld. De eerste worden aangeduid als de WB21 scenario's, de laatste als de KNMI'06 scenario's.

6.1.1 WB21 scenario's

De hoge rivierstanden in 1993 en 1995 en de wateroverlast door extreme neerslag in 1998 hebben geleid tot het instellen van de Commissie Waterbeheer 21^{e} 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 GCMs en de

relatie tussen temperatuur en neerslag in Nederland. Een overzicht van deze scenario's is te zien in Tabel 3.

Tabel 3. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050.

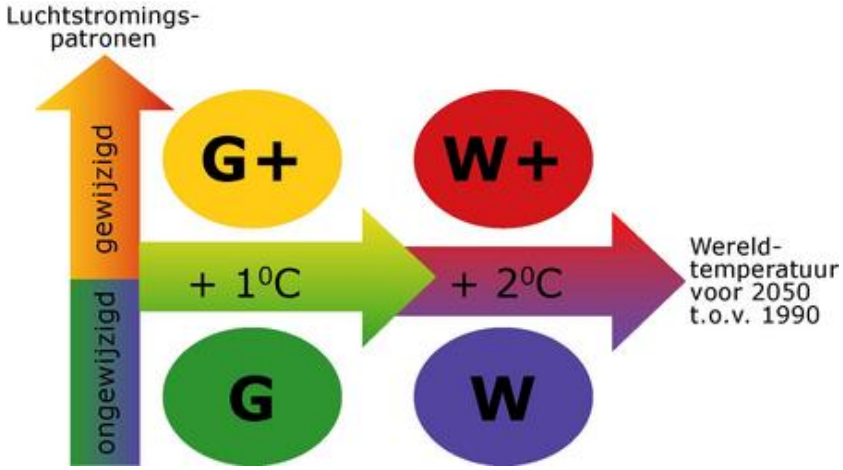
	WB21			KNMI'06			
	Laag	Centraal	Hoog	G	G+	W	W+
Zomer (juni, juli, augustus)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.4	+1.7	+2.8
warmste zomerdag (°C)				+1.0	+1.9	+2.1	+3.8
gemiddelde neerslag (%)	+0.5	+1	+2	+3	-10	+6	-19
aantal natte dagen (%)				-2	-10	-3	-19
neerslag op 1% natste dag (%)	+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

6.1.2 KNMI'06 scenario's

De nieuwe KNMI'06 scenario's voor neerslag en potentiële verdamping 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 (Figuur18). 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. Die 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 meegnomen: de G+ en W+ scenario's.



Figuur18: 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.

6.2 *Klimaatscenario's voor Waterschap Rivierenland*

De hydrologie in de Quarles van Ufford polder wordt gestuurd door (i) neerslag en potentiële verdamping en (ii) de waterstanden van de Waal en de Maas. Beide worden in belangrijke mate beïnvloed door klimaatverandering. Om het gezamenlijke effect te beoordelen wordt met behulp van het ontwikkelde model een aantal berekeningen uitgevoerd voor het meest extreme W+ scenario in 2050. De 10-jarige neerslag en potentiële verdamping tijdreeksen 1995-2004 worden getransformeerd naar een 10-jarige reeks rond het jaar 2050 en ter vergelijk naar een 10-jarige reeks rond het jaar 2100. Voor de waterstanden op de Waal en Maas zijn alleen gegevens beschikbaar voor 2050 en voor deze situatie zullen reeksen met waterstanden worden gegenereerd.

6.2.1 Veranderingen in neerslag en potentiële verdamping

Bij het transformeren van tijdreeksen dienen de volgende kanttekeningen geplaatst te worden.

- Het transformeren van historische tijdreeksen is slechts één manier om tijdreeksen voor de toekomst te verkrijgen. De volgorde van temperatuurwisselingen, jaar-op-jaar variaties, etc. in de getransformeerde tijdreeksen wordt sterk bepaald door wat er in het verleden is gebeurd;
- De getransformeerde tijdreeksen geven geen voorspellingen voor wat in een bepaald toekomstig jaar de neerslag en temperatuur zal zijn. In de toekomst kan de volgorde van "jaren" in de getransformeerde tijdreeksen anders zijn, maar ook de variatie binnen jaren.

Om de neerslag reeks te transformeren wordt gebruik gemaakt van drie variabelen: de veranderingen in het aantal natte dagen (f_{wet}), de gemiddelde hoeveelheid regen op een natte dag (m_{wet}) en het 99% percentiel. Deze grootheden zijn per maand bekend voor de periode rond 2050 en 2100 (Tabel 4).

Tabel 4. Maandelijkse procentuele verandering in het aantal natte dagen (f_{wet}), gemiddelde neerslag op een natte dag (m_{wet}), en het 99% percentiel (Q_{99}) voor 2050 en 2100.

	W+ 2050			W+ 2100		
Maand	f_{wet}	m_{wet}	Q_{99}	f_{wet}	m_{wet}	Q_{99}
januari	3	13	11	5	25	22
februari	1	12	11	4	24	22
maart	-2	10	11	-1	21	23
april	-9	6	12	-11	16	23
mei	-15	3	12	-21	11	24
juni	-19	1	12	-31	5	24
juli	-20	0	12	-40	0	25
augustus	-19	1	12	-45	-3	25
september	-15	3	12	-39	1	25
oktober	-8	7	12	-21	11	24
november	-1	10	11	-6	19	23
december	1	12	11	3	23	22

Voor potentiële verdamping is een iets andere benadering gebruikt en zijn de gemiddelde procentuele veranderingen per seizoen aan de waargenomen tijdserie opgelegd (Tabel 5)

Tabel 5. Gemiddelde procentuele verandering in potentiële verdamping per seizoen: DJF = december, januari, februari, MAM = maart, april, mei, JJA = juni, juli, augustus, SON = september, oktober, november.

	W+ 2050	W+ 2100
DJF	3.0	6.0
MAM	7.2	14.4
JJA	15.2	30.4
SON	10.4	20.8

De gemeten neerslag en verdamping reeks voor het meteorologische station Megen is op deze manier getransformeerd voor de periode 1995-2004 en wordt gebruikt als invoer in het model. Tabel 6 geeft de 10-jarige gemiddelden voor neerslag en potentiële verdamping weer. Het meest valt het op dat het neerslagtekort in de zomer enorm toeneemt van 76 mm in 2000 tot 239 mm in 2100. In de zomer neemt de neerslag af en de potentiële verdamping toe. Over het gehele jaar gezien blijft er een neerslag overschot, maar het verschil wordt steeds kleiner richting het jaar 2100.

Tabel 6. Gemiddelde seizoensneerslag en potentiële verdamping voor 1995-2004, 2045-2054 en 2095-2104 vpr het W+ scenario.

	DJF	MAM	JJA	SON	Totaal
1995-2004					
P (mm)	208	167	204	212	791
ET_{ref} (mm)	32	180	280	92	584
2045-2054					
P (mm)	236	162	166	209	773
ET_{ref} (mm)	33	193	323	102	650
2095-2104					
P (mm)	267	172	127	186	752
ET_{ref} (mm)	34	206	366	111	716

6.2.2 Verandering in rivier waterstanden

De veranderende neerslagpatronen hebben een grote invloed op de gemiddelde afvoeren van de rivieren. Op basis van de Rhineflow3 en Meuseflow2 modellen (Van Deursen, 2002) zijn de nieuwe klimaatscenario's van het KNMI doorgerekend.

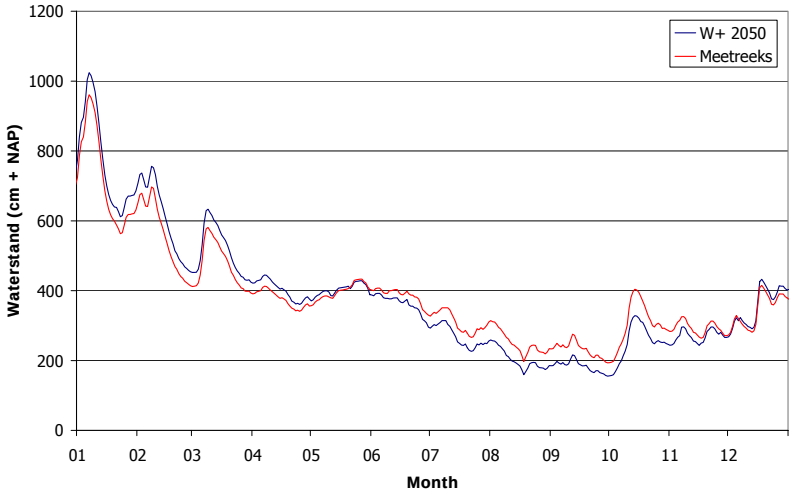
Voor elk scenario is berekend wat de verandering is in gemiddelde afvoer per decade in de Rijn en de Maas, wanneer de verschillende klimaatscenario's worden toegepast.

De gegevens voor de Rijn en de Maas zijn met behulp van de uitkomsten van Van Deursen omgerekend naar reeksen die representatief zijn voor de gebruikte klimaatscenario's. Dit is gebeurd door eerst een relatie tussen waterstand en afvoer af te leiden met behulp van de waternormalen van de meetlocaties in Tiel en Grave Beneden (Waternormalen.nl, 2005). Vervolgens zijn de verkregen debieten vermenigvuldigd met de gemiddelde decadeverandering, om vervolgens weer terug te worden berekend naar een waterstand.

Deze methode is slechts een grove methode om de rivierreeksen om te rekenen. Er zijn nog geen standaardmethoden beschikbaar om een rivierreeks om te zetten. Deze methode gebruikt een aantal veronderstellingen, die misschien resulteren in een onnauwkeurige schatting. Er wordt vanuit gegaan dat de veranderde gemiddelde afvoeren in Lobith en Borgharen overeenkomen met de veranderde

gemiddelde afvoeren in Tiel en Grave Beneden. Dit kan verschillen door de aanwezigheid van zijrivieren en kanalen.

Figuur19 geeft een voorbeeld van het effect van klimaatverandering op de waterstand bij Tiel. Hierbij is gebruik gemaakt van het jaar 2003 en de decade veranderingen voor het W+ scenario. Voornamelijk in de zomer periode is duidelijk te zien dat de rivierstanden lager zijn dan in de huidige situatie, terwijl ze juist iets hoger zijn in de winter.



Figuur19: Effect van klimaatverandering (W+, 2050) op de waterstanden bij Tiel op basis van de 2003 meetreeks.

6.3 Huidige situatie

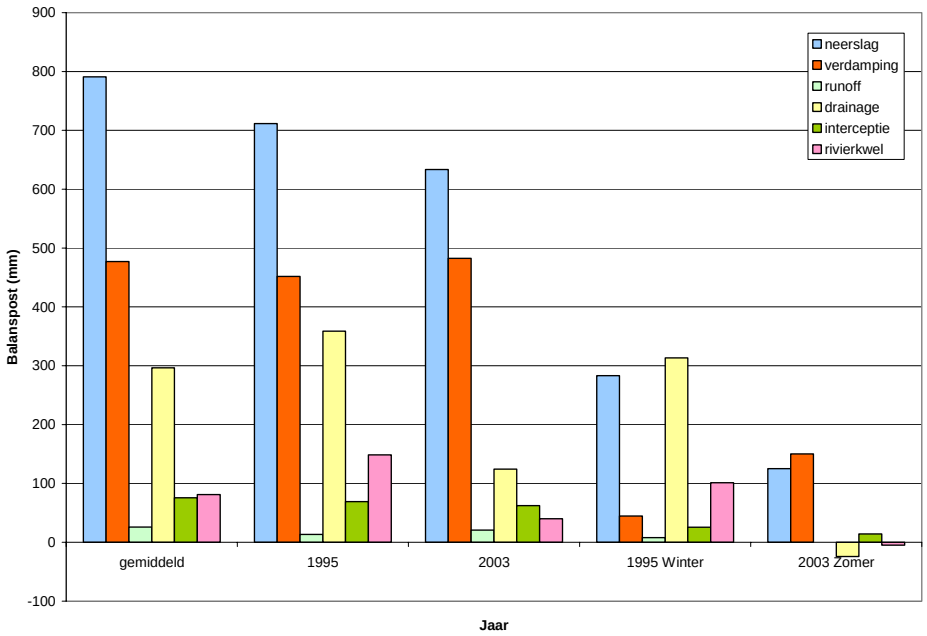
Deze paragraaf analyseert de huidige toestand van de waterhuishouding van Polder Quarles van Ufford. Het model inclusief de oppervlaktewatermodule is doorgerekend voor een periode van 10 jaar (1995 – 2004). De onderstaande analyses zijn gedaan voor zowel 10-jarige gemiddelden als voor de winter van 1995 ((januari, februari, maart) en de zomer van 2003 (juli, augustus, september).

Gemiddeld valt er 791 mm neerslag en is er 81 mm kwel. Van deze 872 mm verdampt er 477 mm en wordt er 296 mm gedraineerd. De rest verdwijnt uit het systeem door interceptie en oppervlakkige afstroming. Tussen de maanden zijn er ook grote verschillen. Logischerwijs is de actuele verdamping het grootst in de zomer (~ 80 mm/maand). Omdat de neerslag redelijk constant verdeeld is over het jaar wordt de hoogste drainage flux in de winter waargenomen (~ 60 mm/maand). Ook is de kwelflux het grootst in de winter vanwege de hoge rivierwaterstanden. Aan de balans post, een maat voor de bodemberging, is duidelijk te zien dat de bodemprofielen zich vullen in het najaar. Verder valt op dat er in de zomer netto infiltratie plaatsvindt.

Tabel 7. Gemiddelde maandelijkse water balansen voor de gehele polder voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie

Maand	Neerslag	Interceptie	Verdamping	Oppervlakte afvoer	Infiltratie (+) / Drainage (-)	Kwel (+) / Wegzijging (-)	Balans
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
januari	69	-6	-7	-4	-69	14	-2
februari	67	-6	-13	-2	-64	16	-1
maart	56	-5	-28	-3	-47	17	-11
april	46	-5	-53	0	-14	7	-20
mei	65	-7	-80	-2	-5	5	-24
juni	68	-7	-79	-1	-5	4	-19
juli	74	-8	-77	0	1	1	-8
augustus	63	-6	-62	-2	4	0	-4
september	69	-6	-44	-3	-2	1	14
oktober	72	-6	-22	-4	-11	1	30
november	71	-7	-8	-4	-35	8	25
december	71	-6	-5	-2	-49	8	17
totaal	791	-76	-477	-26	-296	81	-3

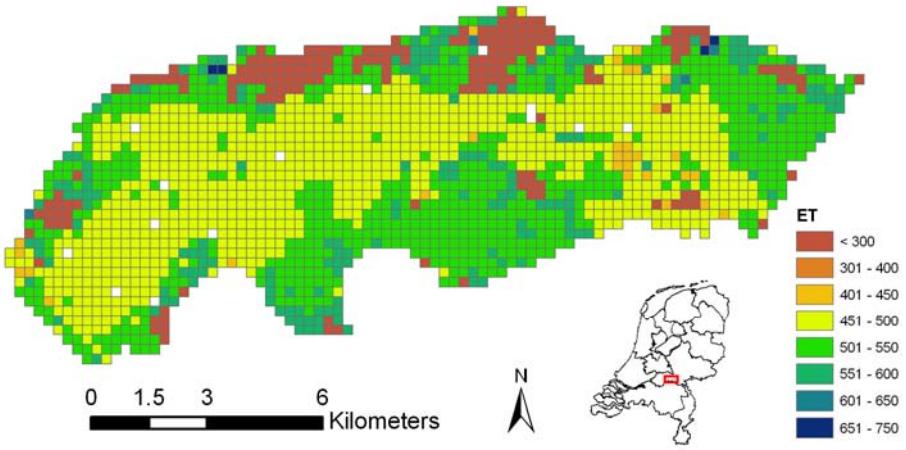
In Figuur 20 zijn de water balansen voor verschillende perioden grafisch weergegeven. Tussen de seizoenen en de jaren zijn er ook grote verschillen. In de natte winter van 1995 wordt al meer dan 300 mm gedraineerd, terwijl er in de droge zomer van 2003 geen drainage is, maar er zelf water wordt geïnfiltreerd vanuit het oppervlakte water systeem.



Figuur 20: Waterbalansen voor verschillende periodes voor Quarles van Ufford

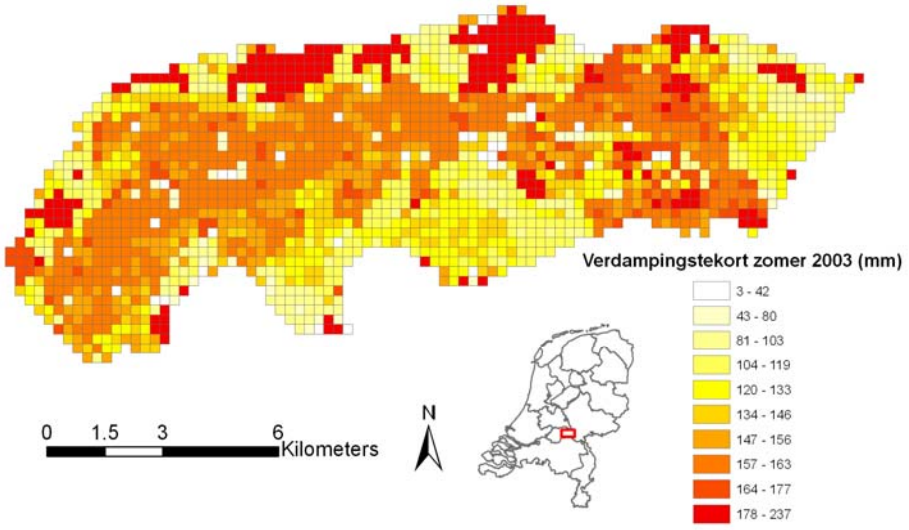
In Figuur 21 is de ruimtelijke spreiding in actuele verdamping weergegeven. Gemiddeld ligt de jaarlijkse verdamping rond de 500 mm, maar er zijn grote ruimtelijk verschillen. Met name de steden (alleen bodemverdamping) en de kleigronden in het centrale gedeelte van de polder verdampen

minder. In stedelijk gebied treedt geen transpiratie op en de zware kleigronden houden het vocht met een grote zuigspanning vast, waardoor het niet beschikbaar is voor verdamping door gewassen.



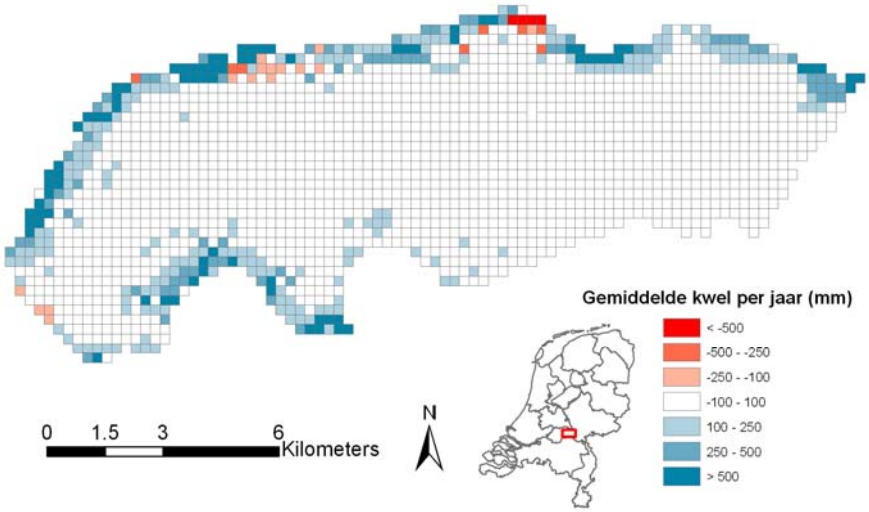
Figuur 21: Gemiddelde jaarlijkse som actuele transpiratie en evaporatie voor de periode 1995-2004

Figuur 22 geeft het verdampingstekort, gedefinieerd als het verschil tussen potentiële en actuele verdamping weer. Gedurende de extreem droge zomer van 2003 lopen deze tekorten in de centrale landbouwgronden op tot 150 mm, wat significante opbrengstreducties tot gevolg heeft. Deze hoge opbrengstreducties kunnen verklaard worden uit het feit dat er op dit moment geen beregening en wateraanvoer wordt gemodelleerd. Als dit in de toekomst wordt meegenomen dan is het de verwachting dat de opbrengstreductie een stuk kleiner zullen zijn.



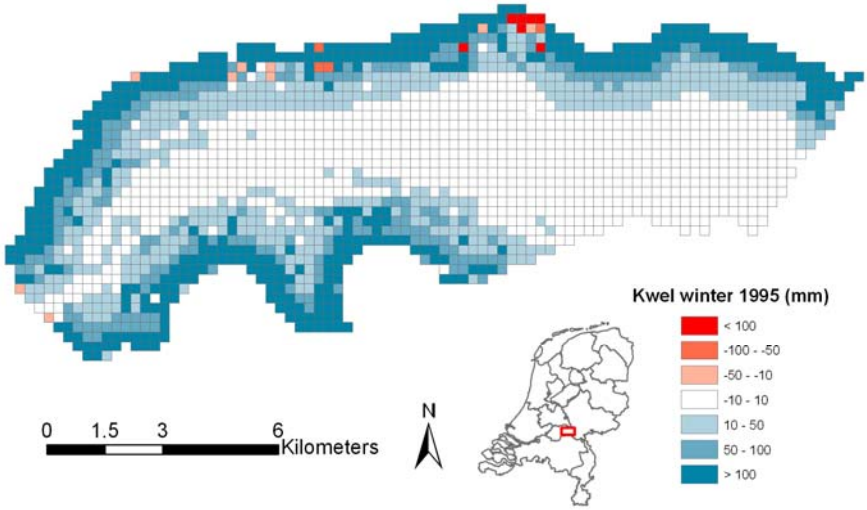
Figuur 22: Totale verdampingstekort gedurende de zomer van 2003

De gemiddelde kwel per jaar is weergegeven in Figuur 23. Vooral langs de Maas en Waal is gemiddeld over een jaar gezien het grootst. Voor de gehele polder is de kwel gemiddeld 100 mm.



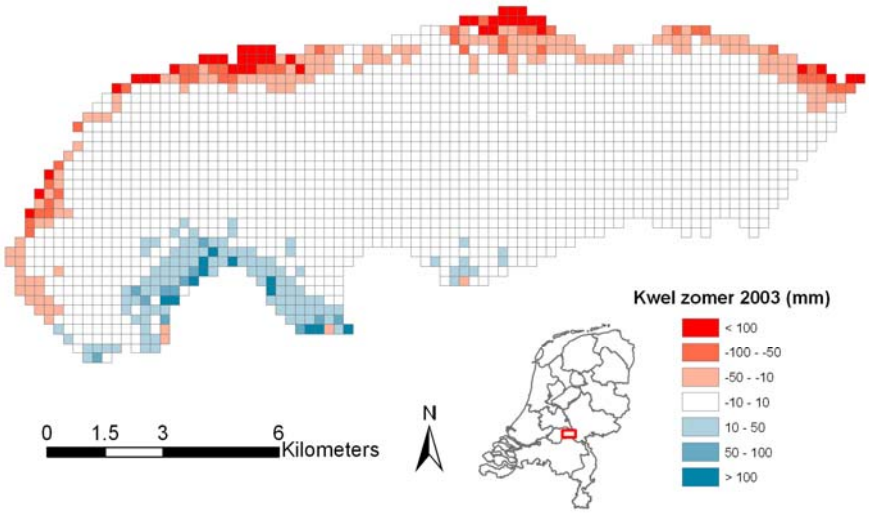
Figuur 23: Gemiddelde jaarlijkse kwel/wegzijging voor de periode 1995-2003 (negatieve waarde = wegzijging)

Naast de jaarlijkse totalen is vooral de ruimtelijke kwel dynamiek over de verschillende seizoenen van belang. Figuur 24 en Figuur 25 laten de kwel zien voor de natte winter van 1995 en de droge zomer van 2003. De dynamiek langs de grote rivieren is het grootste, vooral langs de Waal waar de fluctuatie in rivierstanden een stuk groter zijn dan op de (gestuwde) Maas. In de natte winter 1995 zijn er locaties met meer dan 100 mm kwel in de winter en in de zomer van 2003 hebben diezelfde meer dan 100 mm wegzijging. Dit heeft grote invloed op de waterhuishouding en landbouwkundige productie in de polder.



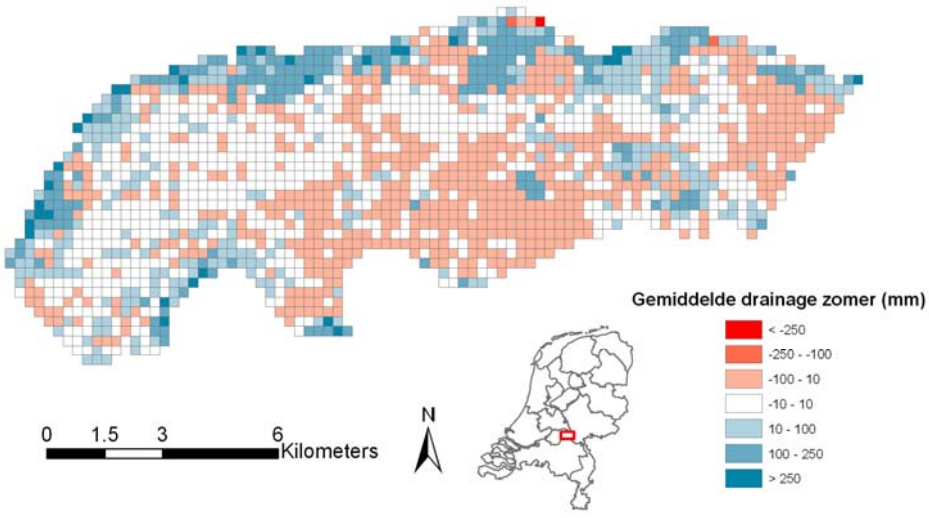
Figuur 24: Kwel/wegzijging in de winter van 1995 (negatieve waarde = wegzijging)

In de winter, als de rivierwaterstanden hoog zijn, is de kwel zowel langs de Waal als de Maas relatief groot. In de zomer treedt er in de gebieden langs de Waal vooral wegzijging op terwijl er langs de Maas nog wel kwel optreedt.



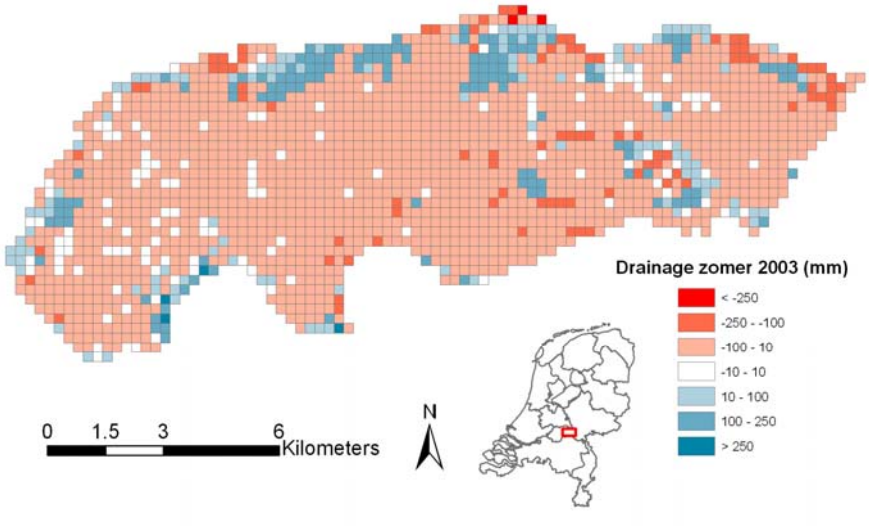
Figuur 25: Kwel/wegzijging in de zomer van 2003 (negatieve waarde = wegzijging)

Figuur 26 geeft de gemiddelde drainage in de zomer weer. De drainage is het grootst langs de Waal en het kleinst in de zuidoost hoek van de polder waar voornamelijk infiltratie optreedt. De ruimtelijke patronen vertonen gelijkenis met de ruimtelijke kwelpatronen.



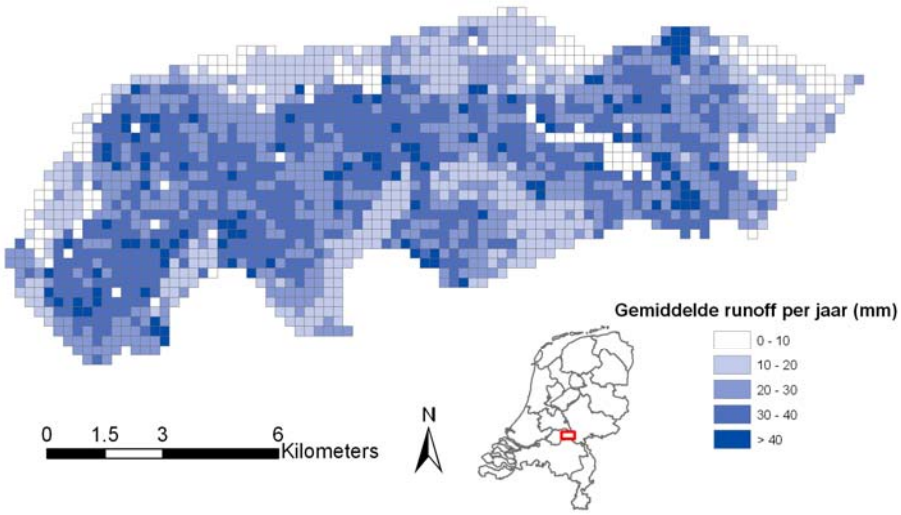
Figuur 26: Gemiddelde drainage/infiltratie in de zomer voor de periode 1995-2004 (negatieve waarde = infiltratie).

Figuur 27 geeft een ruimtelijk beeld van de drainage en infiltratie in de droge zomer van 2003. Voor het merendeel van de polder is er nu netto infiltratie vanuit het oppervlakte water in plaats van netto drainage.



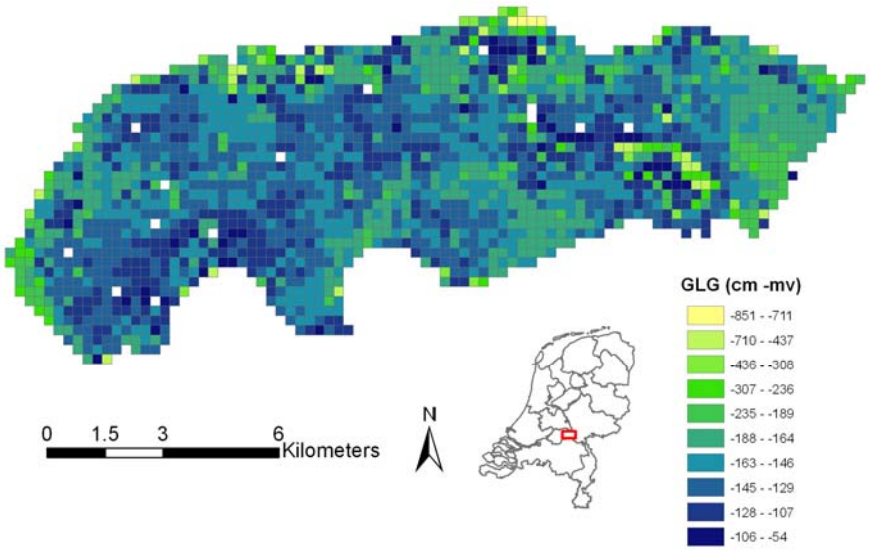
Figuur 27: Drainage/infiltratie in de zomer van 2003 (negatieve waarde = infiltratie)

De gemiddelde jaarlijkse runoff (oppervlakkige afstroming) is weergegeven in Figuur 28. Gemiddeld voor een heel jaar is er 26 mm runoff. Ruimtelijk zijn er ook verschillen. Met name de kleigronden in het middengebied van de polder hebben een relatieve hoge runoff ten gevolge van een lage infiltratie capaciteit.

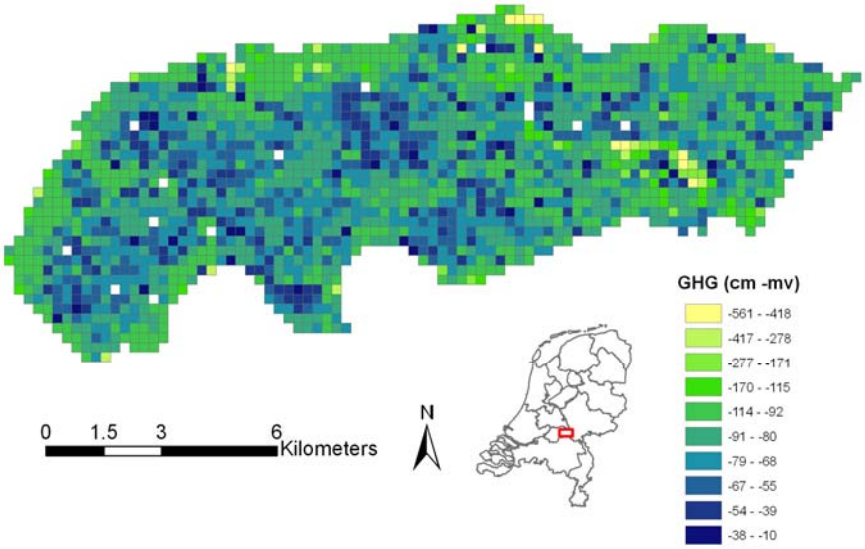


Figuur 28: Gemiddelde jaarlijkse runoff voor de periode 1995-2004

Op basis van de 10-jarige simulatie 1995-2004 zijn de GLG en GHG berekend. Over het algemeen geldt voor zowel de GHG als de GLG dat deze het hoogst zijn op de kleigronden. Er zijn wel ruimtelijke verschillen, maar is is geen duidelijke gradiënt waarneembaar.



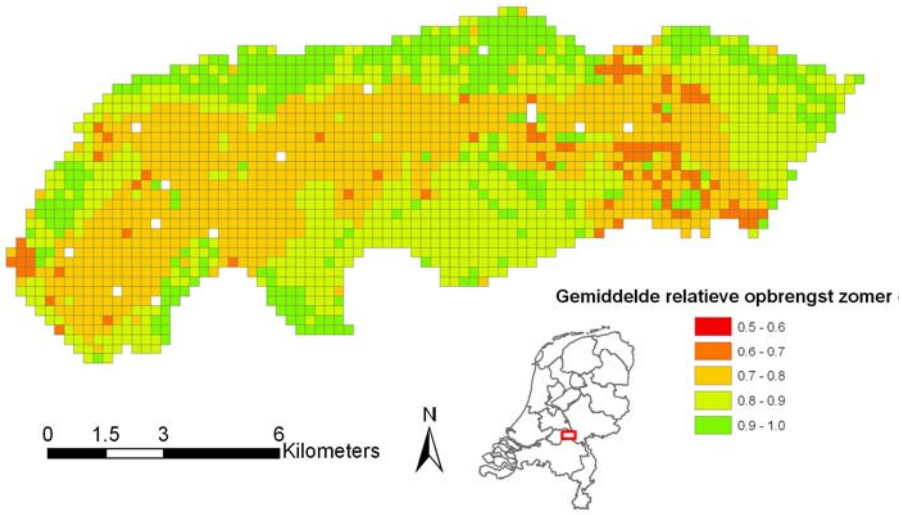
Figuur 29: GLG gebaseerd op 1995-2004 gegevens



Figuur 30: GHG gebaseerd op 1995-2004 gegevens

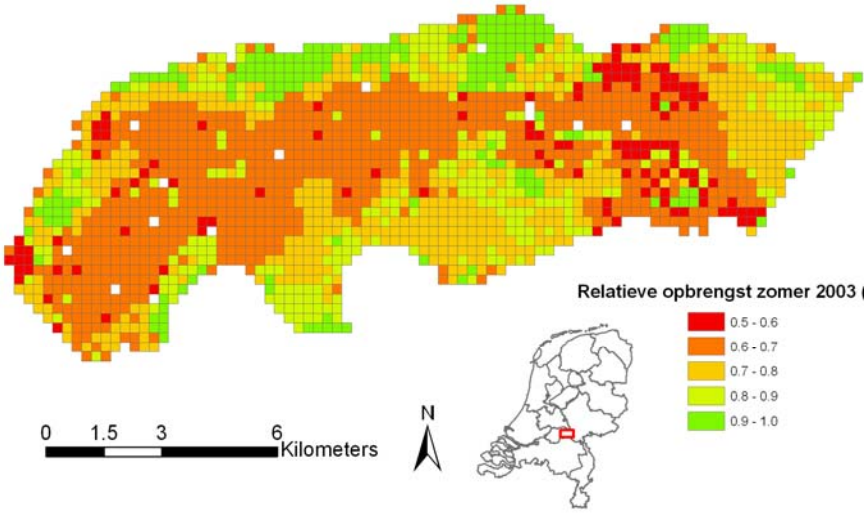
De gemiddelde relatief opbrengst is evenredig met de verhouding tussen actuele en potentiële verdamping. Deze relatieve opbrengsten zijn ruimtelijk weergegeven aan het eind van het groeiseizoen (30 september) als gemiddelde voor de periode 1995-2004 (Figuur 31) en voor de zomer van 2003 (Figuur 32). Gemiddeld liggen de opbrengstreducties voor de zware kleigronden rond de 0.7-0.8 en langs de Waal rond de 0.9-1.0. Dit zijn aanzienlijke opbrengstreductie die in de praktijk waarschijnlijk een wat hoger zullen liggen. Dit is te verklaren uit het feit dat op dit moment in het model geen beregening of sub-surface infiltratie meegenomen is om het bodemvocht voor de landbouw gebieden op peil te houden. Ook het ruimtelijk patroon is opmerkelijk. De verwachting is namelijk dat de droogte gevoeligheid langs de grote rivieren het grootst is en het kleinst in het relatief natte middel gebied.

Een mogelijke verklaring kan gevonden worden in de waterretentie karakteristieken van de zware kleigronden. Het water wordt zo sterk vastgehouden in de bodem dat de wortels niet in staat zijn dit te onttrekken.



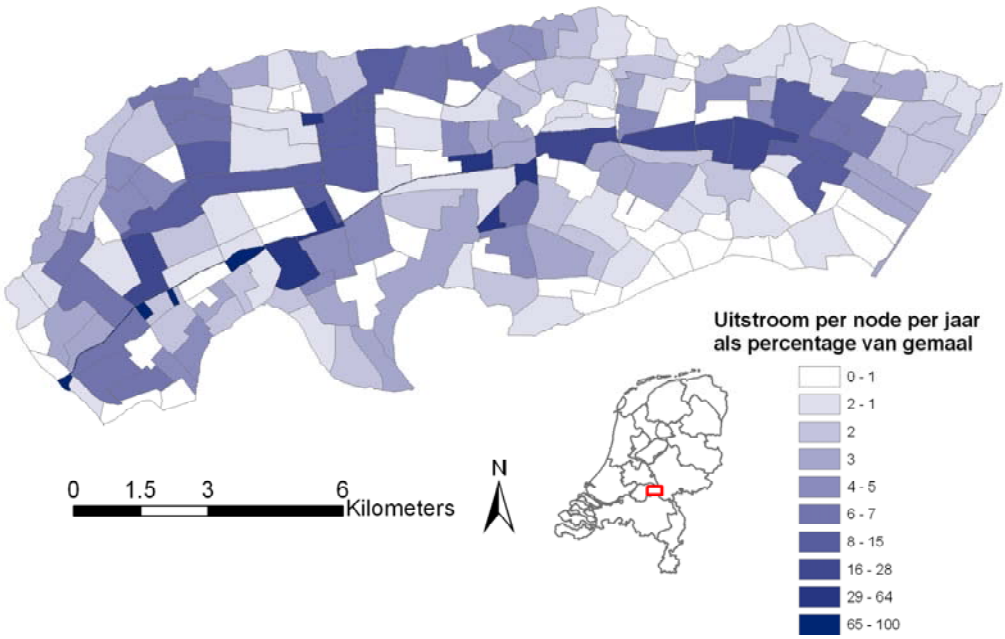
Figuur 31: Gemiddelde relatieve opbrengst op 30 september voor de periode 1995-2004

Een extreem droge zomer heeft een significante verdere reductie van de opbrengst tot gevolg. Het verschil is het grootst in het centrale gedeelte van de polder (0.6-0.7). In de praktijk zal er meer gebiedvreemd water moeten worden aangevoerd voor beregening om deze reductie tegen te gaan.



Figuur 32: Relatieve opbrengst op 30 september 2003

Figuur 31 geeft de relatieve uitstroom als functie als fractie van de totale uitstroom bij het hoofdgemaal van de polder weer. De figuur geeft inzicht in ruimtelijke patroon in afvoeren rekening houdend met de afvoerrichting.

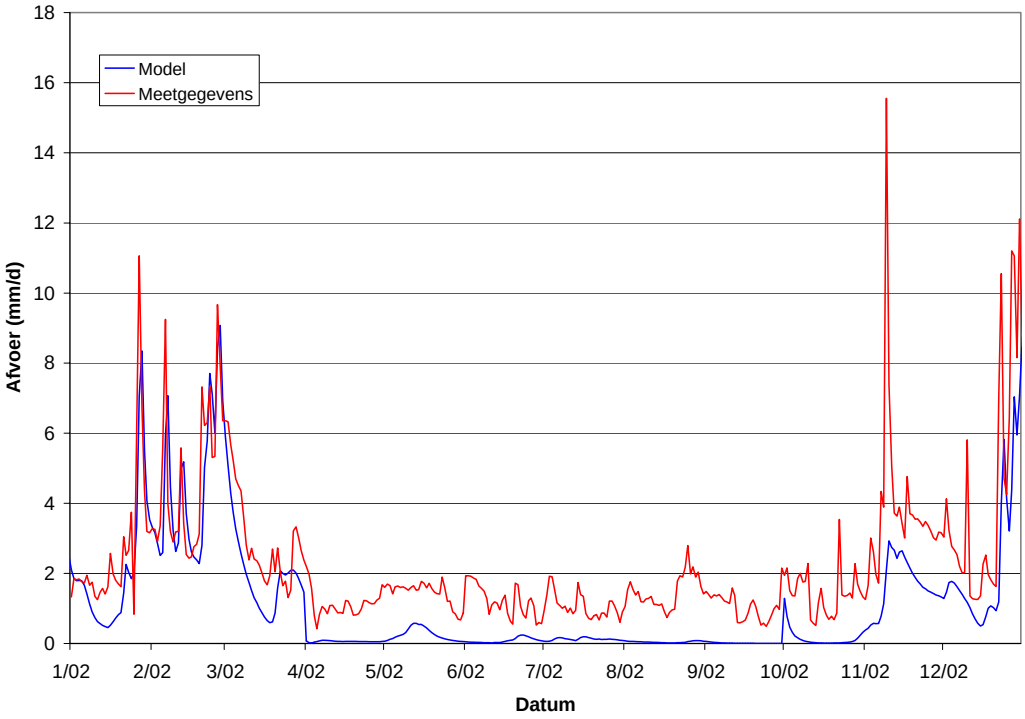


Figuur 33: Relatieve uitstroom als percentage van totale uitstroom bij gemaal Quarles van Ufford voor de huidige situatie

De resultaten van de oppervlakte water module zijn vergeleken met een gemeten reeks bij het hoofdgemaal van de polder voor het jaar 2002 (Figuur 34). Een aantal zaken vallen op. De afvoer in januari en februari wordt zeer goed gesimuleerd. Vanaf het vroege voorjaar is de gemeten afvoer structureel hoger dan de gesimuleerde afvoer. Hier zijn verschillende mogelijke verklaringen voor:

- In het model wordt geen gebiedsvreemd water ingelaten. In de praktijk gebeurt dit wel en het zou kunnen dat een klein deel van dit water ook weer wordt afgevoerd ten gevolge van bijvoorbeeld doorspoeling.
- Mogelijkerwijs wordt de kwel vanuit de Maas onderschat. In het model is de afstand tot de rivier gebuikt, maar in de polder bevinden zich een aantal open water gebieden (bijvoorbeeld de Goudenham plas) die in open verbinding staan met de rivier. De afstand tot de rivier, een belangrijke parameter in de kwelmodule, zou als gevolg hiervan dus gereduceerd worden wat meer kwel in het zuidelijke deel van polder zou betekenen en dus meer afvoer.
- De verdamping en met name interceptie worden overschat.

Het verschil in de afvoerpiek in november is hoogst waarschijnlijk het gevolg van een lokale regenbui die niet gemeten is in het meteorologische station Megen dat net ten zuiden van de polder ligt.



Figuur 34: Gemeten en gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder.

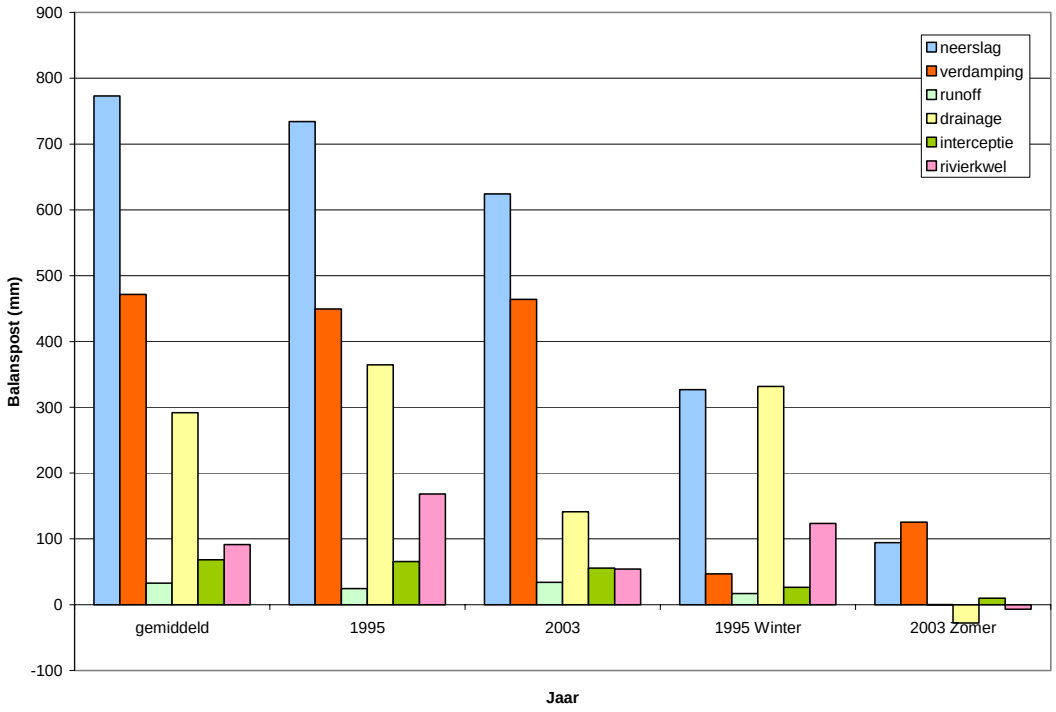
6.4 *Klimaatverandering: het W+ scenario in 2050*

De klimaattransformaties zoals besproken in paragraaf 6.2 zijn als input in FutureViewR gebruikt. Er is wederom gekeken naar een 10 jarige gemiddelde en naar een getransformeerd droog en nat jaar. De periode gedefinieerd als "gemiddeld 2050" heeft betrekking op de 10 jarig getransformeerde reeks 1995-2004. De scenario's 2050d (droog) en 2050n (nat) hebben betrekking op de getransformeerde reeks voor respectievelijk 2003 en 1995.

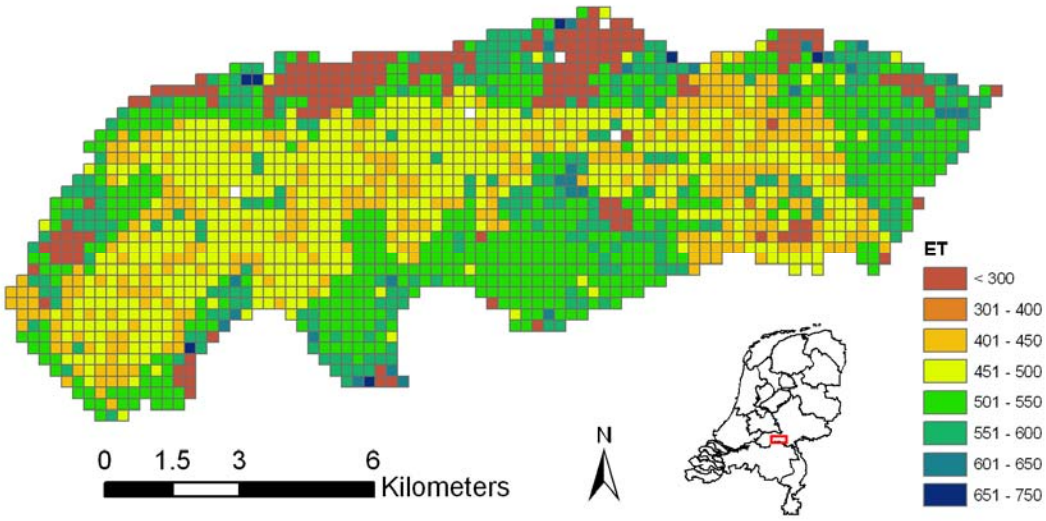
Tabel 8 geeft de maandelijkse gemiddelde waarden van de waterbalans componenten weer en Figuur 35 laat voor een aantal belangrijke periode uit de reeks de waterbalans grafisch zien. Over het gehele jaar genomen zijn de verschillen niet extreem groot. De totale jaarlijkse neerslag neemt af van 791 mm naar 777 mm en de actuele verdamping blijft nagenoeg constant (477 mm), terwijl de potentiële verdamping wel significant toeneemt van 584 mm naar 650 mm. De jaarlijks kwel neemt toe van 81 mm tot 92 mm. Tussen de verschillende maanden zijn wel duidelijke verschillen waar te nemen. De winters worden natter en de zomers droger en dit heeft duidelijk effect op de overige waterbalans componenten.

Tabel 8. Gemiddelde maandelijkse water balansen voor de gehele polder voor de periode 1995-2004 voor het W+ scenario

Maand	Neerslag (mm)	Interceptie (mm)	Verdamping (mm)	Oppervlakte afvoer (mm)	Infiltratie (+) / Drainage (-) (mm)	Kwel (+) / Wegzijging (-) (mm)	Balans (mm)
januari	80	-6	-7	-7	-76	18	2
februari	77	-6	-13	-4	-75	21	0
maart	61	-5	-30	-3	-55	22	-11
april	45	-5	-57	0	-17	10	-24
mei	57	-5	-82	-1	-4	5	-31
juni	56	-6	-79	-1	-1	3	-28
juli	59	-6	-73	0	4	0	-15
augustus	51	-5	-53	-1	6	-1	-3
september	60	-5	-41	-3	4	-1	15
oktober	72	-6	-24	-4	-4	0	33
november	78	-7	-9	-4	-24	6	39
december	81	-6	-5	-4	-51	9	24
totaal	777	-69	-474	-33	-293	92	0

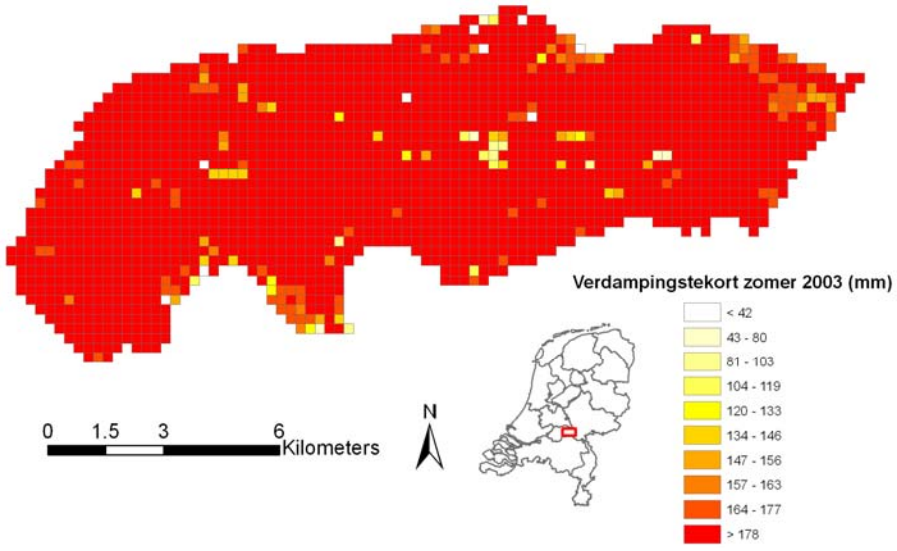


Figuur 35: Waterbalans voor verschillende perioden voor het W+ scenario



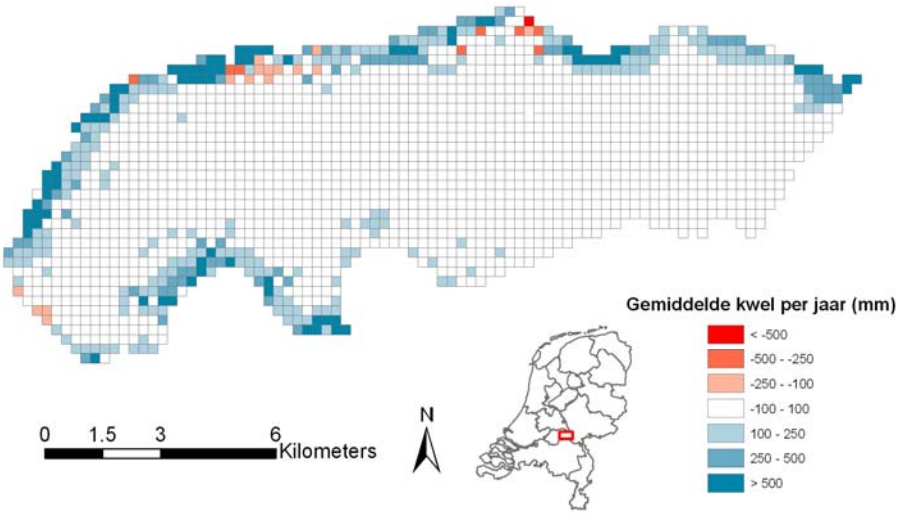
Figuur 36: Gemiddelde jaarlijkse som actuele transpiratie en evaporatie voor de periode (gemiddeld 2050)

Figuur 36 geeft de gemiddelde ruimtelijke actuele verdamping weer. In de kleigebieden neemt de verdamping iets af, terwijl in andere gebieden juist een toename te zien is.

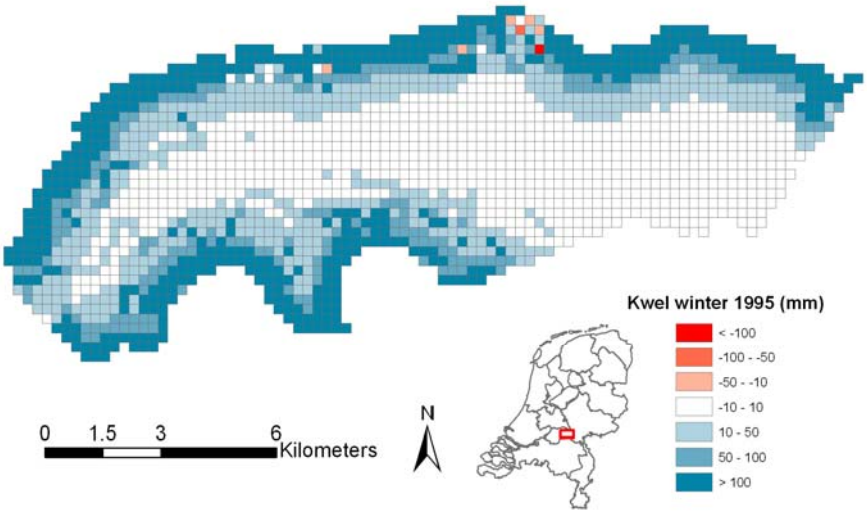


Figuur 37: Totale verdampingstekort gedurende de zomer van 2050d

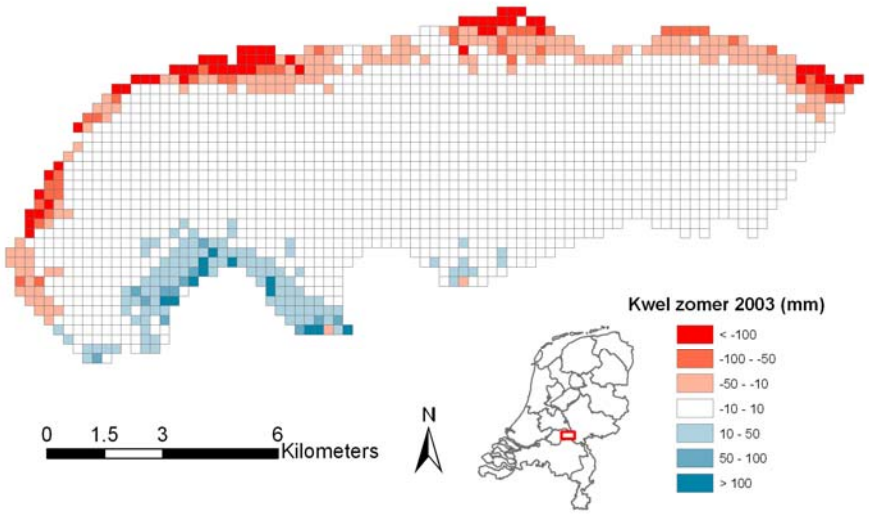
Figuur 37 geeft het verdampingstekort weer in een extreem droge zomer rond het jaar 2050. De kaart is afgebeeld met dezelfde legenda als voor de 2003 zomer. Er is een flinke toename in verdampingstekort. Dit wordt veroorzaakt doordat de referentie verdamping flink toeneemt onder klimaatverandering en de actuele verdamping nagenoeg constant blijft.



Figuur 38: Gemiddelde jaarlijkse kwel/wegzijging (gemiddeld 2050) (negatieve waarde = wegzijging)

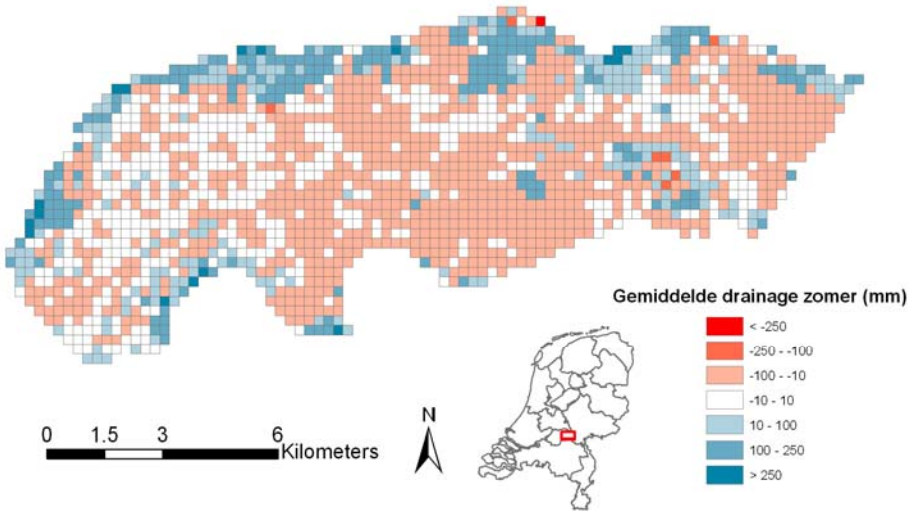


Figuur 39: Kwel/wegzijging in de winter van 2050n (negatieve waarde = wegzijging)



Figuur 40: Kwel/wegzijging in de zomer van 2050d (negatieve waarde = wegzijging)

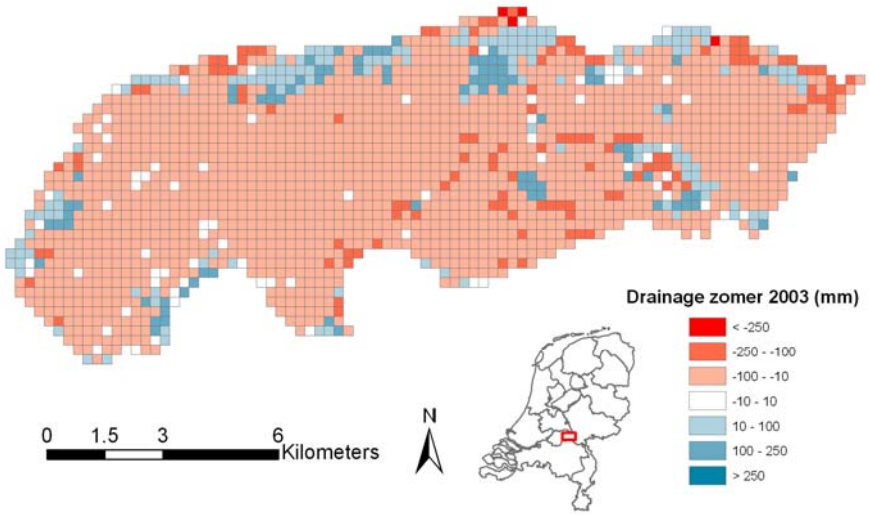
Figuur 38, Figuur 39 en Figuur 40 geven ruimtelijke kwelpatronen weer. Hoewel de gemiddelde jaarlijkse kwel met 11 mm toeneemt zijn er ruimtelijk geen grote verschillen waarneembaar. Dit geldt voor zowel het langjarige gemiddelde als voor een extreem natte winter en een extreem droge zomer. Dit is te verklaren uit het feit dat de rivierwaterstanden niet enorm veranderen bij gebruik van deze initiële klimaatruns.



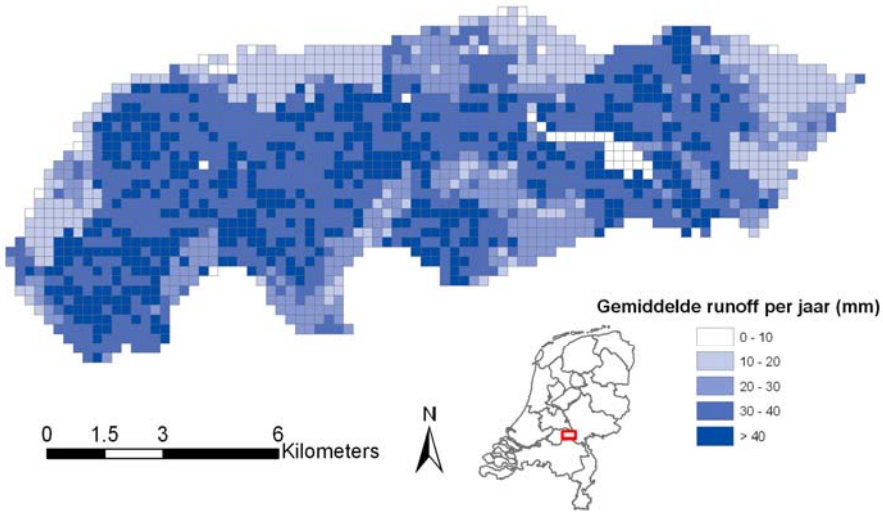
Figuur 41: Gemiddelde drainage/infiltratie in de zomer (gemiddeld 2050) (negatieve waarde = infiltratie)

Figuur 41 en Figuur 42 geven de drainage en infiltratie weer voor het W+ scenario voor een gemiddelde zomer rond 2050 en voor een extreem droge zomer rond 2050. In beide gevallen neemt

de netto drainage af. Voor een gemiddelde zomer is het gebied waar water infiltreert inde zomer een stuk groter geworden.

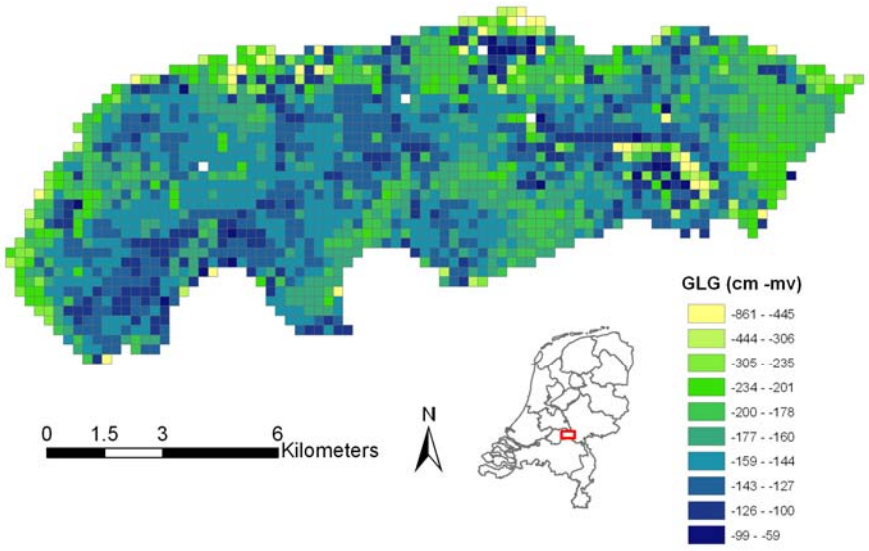


Figuur 42: Drainage/infiltratie in de zomer van 2050d (negatieve waarde = infiltratie)

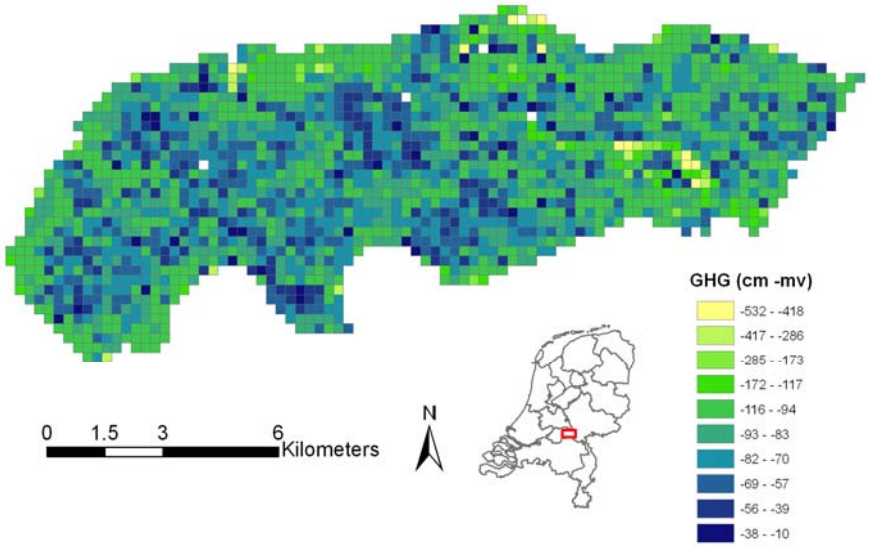


Figuur 43: Gemiddelde jaarlijkse runoff (gemiddeld 2050)

De gemiddelde jaarlijkse runoff is iets toegenomen (7 mm), maar ruimtelijk zijn er geen grote verschuivingen waarneembaar (Figuur 43)

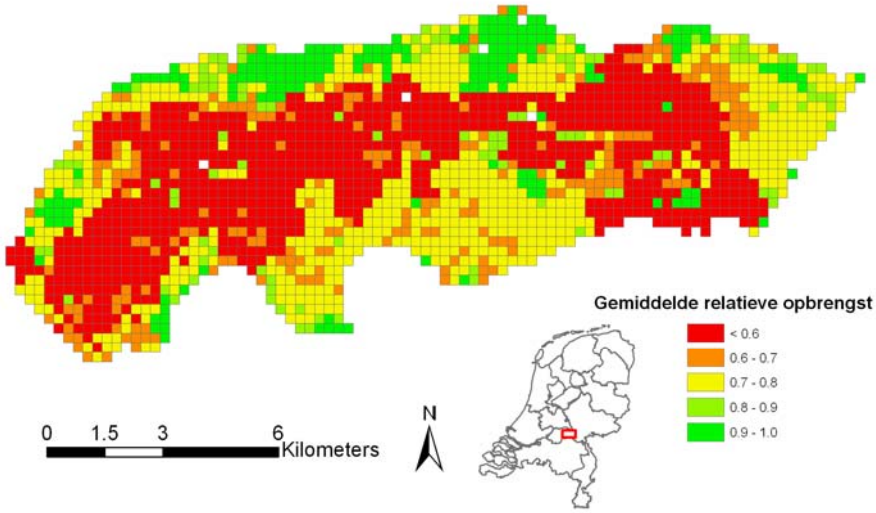


Figuur 44: GLG 2050

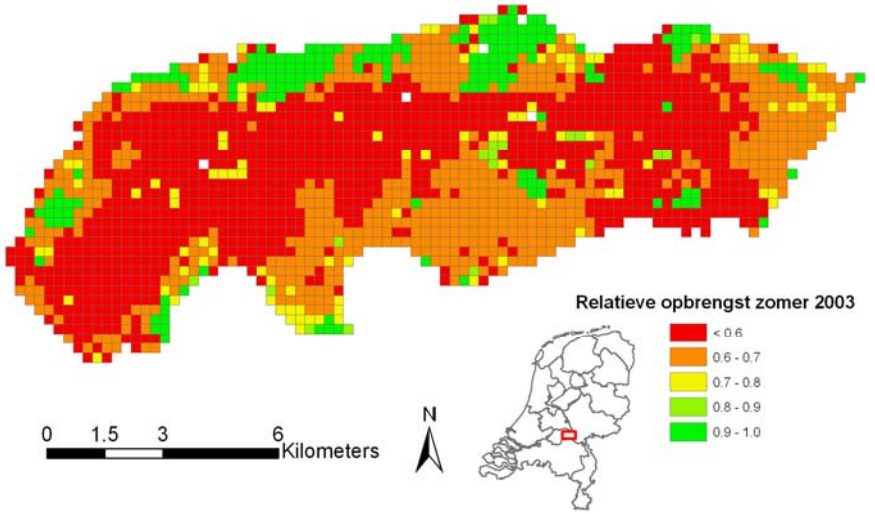


Figuur 45: GHG 2050

De effecten van klimaatverandering op de grondwaterstanden wordt duidelijk uit Figuur 44 en Figuur 45. De GLG neemt over het algemeen iets af en de GHG neemt juist toe. Er is dus sprake van een grotere grondwater dynamiek; de winters worden natter en de zomers droger.

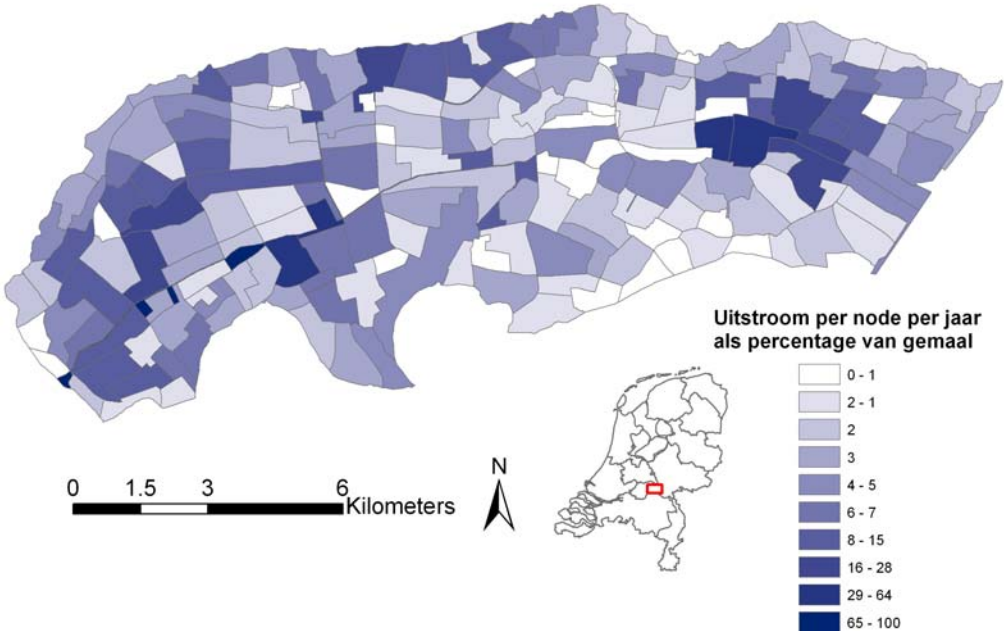


Figuur 46: Gemiddelde relatieve opbrengst op 30 september (gemiddeld 2050)



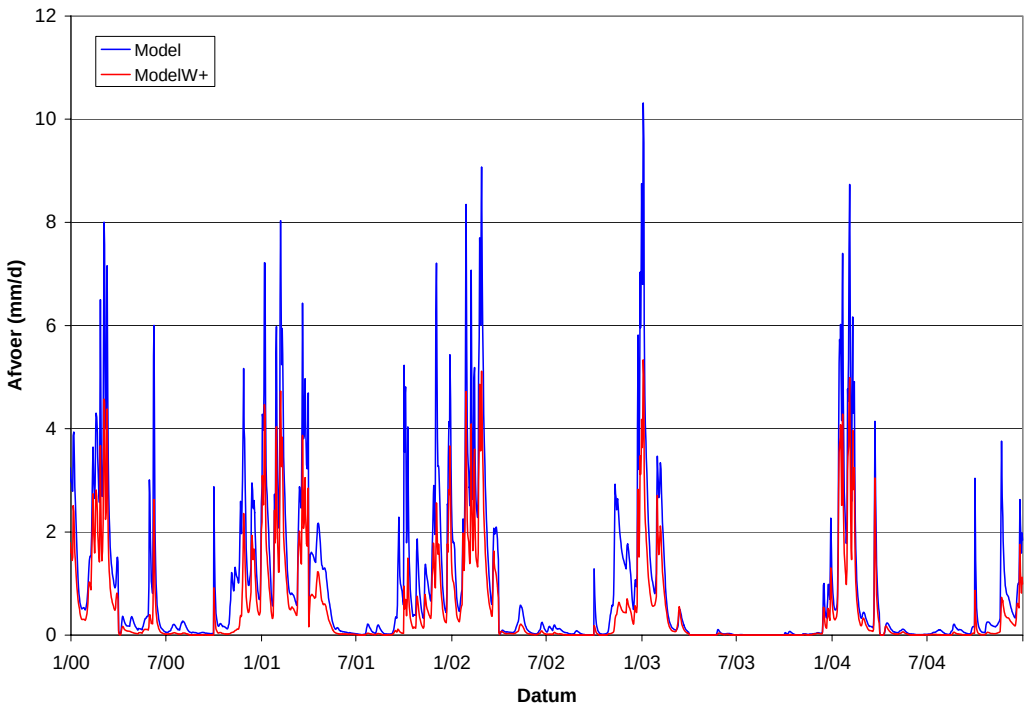
Figuur 47: Relatieve opbrengst op 2050d

Figuur 46 en Figuur 47 geven de relatieve opbrengst weer voor een gemiddelde en een extreem droge zomer weer rond het jaar 2050. In vergelijk met de periode 1995-2004 zijn er flinke afnamen van de relatieve opbrengst, omdat de relatieve opbrengst direct afhangt van de verhouding tussen actuele en potentiële verdamping en de potentiële verdamping flink toeneemt. Enige nuancering is echter op zijn plaats. In het huidige model is geen beregening en sub-surface infiltratie meegenomen en in werkelijkheid zullen tekorten deels gecompenseerd worden door extra water aan te voeren. Ook is het zo dat de potentiële landbouwopbrengsten zullen toenemen door de toename in CO_2 en in referentieverdamping. Om die hogere opbrengsten te halen zal echter extra water moeten worden aangevoerd.



Figuur 48: Relatieve uitstroom als percentage van totale uitstroom bij gemaal Quarles van Ufford voor het W+ scenario

Figuur 48 geeft de relatieve uitstroom als percentage van de totale uitstroom bij het gemaal weer. Het generieke patroon is ongeveer gelijk gebleven, maar op bepaalde locaties zijn er toch wel verschillen waarneembaar.



Figuur 49: Gesimuleerde afvoer (huidig en W+) bij het hoofdgemaal van de polder voor de periode 2000-2004

Figuur 49 geeft de gesimuleerde afvoer weer voor de huidige situatie en voor het W+ scenario van 2000 tot 2004. Het valt op de bij klimaatverandering de afvoer uit de polder afneemt gedurende het gehele seizoen. De uiteindelijke hoeveelheid die per jaar moeten worden uitgemalen is de resultante van een groot aantal hydrologische processen. Een voor de hand liggende verklaring is dat in de zomer de bodemkolommen een stuk verder uitdrogen dan in de huidige situatie. De bufferende capaciteit van de bodem is daarom een stuk groter en voordat significante afvoer wordt gegenereerd zullen eerst de bodem profielen verzadigd moeten worden. Dit gebeurt waarschijnlijk een stuk later in het jaar pas.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Hoofddoelstelling

De hoofddoelstelling van het project is het ontwikkelen van een gedetailleerd ruimtelijk gedifferentieerd modelinstrumentarium inclusief open water module voor de polder Quarles van Ufford. Door eerst de ruimtelijke differentiatie verder uit te werken in het FutureViewR model en vervolgens een eenvoudig oppervlakte watermodel hier aan te koppelen is aan deze doelstelling voldaan. De resultaten zijn veelbelovend en een vergelijk tussen waargenomen en gesimuleerde afvoeren bij het hoofdgemaal van de polder schept vertrouwen in de methodiek. Het sterke punt van het instrumentarium is het detail niveau waarmee hydrologische processen kunnen worden meegenomen.
Een unieke eigenschap van het instrument is de mogelijkheid om ruimtelijke effecten van rivierwaterstanden op kwel en wegzijgingsprocessen in de polder te kwantificeren. Normaal gesproken ligt de focus bij overeenkomstige studies op het oppervlakte watersysteem en de ruimtelijke en temporele patronen in hydrologie van de bodem en de ondergrond worden zeer beperkt meegenomen. In dit instrument ligt de nadruk juist op de ruimtelijke gedifferentieerde hydrologische situatie van de bodem en de ondergrond, maar wel met een duidelijke koppeling met het oppervlaktewater systeem. Er kan met het systeem jaarrond worden gerekend, dat wil zeggen in zowel de wateraanvoer als de waterafvoer situatie. In de waterafvoer situatie wordt het overtollige water door het oppervlakte water systeem getransporteerd volgens de dominante waterafvoer richting. In de wateraanvoer situatie wordt aangenomen dat de peilen in de watergangen gehandhaafd blijven en er water kan infiltreren naar de bodemkolommen. Er wordt geadministreerd hoeveel water infiltreert vanuit het oppervlaktewater systeem zodat de sluiting van de massabalansen gegarandeerd is.

7.2 Nevendoelstellingen

7.2.1 Ervaringen gekoppelde modelsuite gebruiken in de toekomst

De koppeling tussen het oppervlaktewatersysteem en FutureViewR is geïmplementeerd. Een aantal kanttekeningen kan hierbij worden geplaatst. Het model concept gaat uit van één dominante stromingrichting. De stromingsrichting ligt in de polder echter niet eenduidig vast en wijzigt in wateraanvoer en waterafvoersituaties. Daarnaast is het niet mogelijk om stroomrichting in de tijd te veranderen als er van een waterafvoer naar een wateraanvoer situatie wordt overgegaan. Voor de wateraanvoersituatie is er daarom voor gekozen om de peilen in watergangen te handhaven en dynamisch bij te houden hoeveel water infiltreert vanuit de watergangen naar de bodemkolommen. Deze punten zullen ook in de toekomst essentieel zijn.

7.2.2 Beschrijving opzetten model vanuit basisgegevens

Hoofdstuk 2 van het rapport geeft duidelijk aan welke stappen genomen moet worden om het model te parameteriseren. De directe koppeling met de database en een GIS hebben dit proces aanzienlijk vereenvoudigd. Via overlays in GIS kan de modelinvoer direct worden weggeschreven naar de database.

7.2.3 Presentatie resultaten in een GIS omgeving

Zowel de invoer als de uitvoer van het model is opgeslagen in een relationele database (SQL Server). Het is gebleken dat deze opzet het mogelijk maakt om op relatief eenvoudige en efficiënte wijze gegevens te extraheren uit de enorme hoeveelheid modeluitvoer. In feite wordt de invoer en uitvoer van bijna 1900 SWAP modellen die voor periodes van 10 jaar op dagbasis zijn doorgerekend centraal opgeslagen. De database wordt bevraagd door middel van apart opgeslagen queries en de resultaten van deze queries worden weer in de database opgeslagen. In ArcGIS wordt een directe verbinding gemaakt met de database en de resultaten kunnen eenvoudig worden gepresenteerd en modelinvoer kan worden gewijzigd.

7.2.4 Klimaatverandering en effecten op de hydrologie

De nieuwe KNMI scenario's zijn gebruikt om de effecten van klimaatverandering op de hydrologie in de polder te bestuderen. De tijdreeks met neerslag en referentie verdamping voor de periode van 1995 tot 2004 is getransformeerd tot een tijdreeks rond het jaar 2050. Omdat veranderingen in rivierwaterstanden gevolgen hebben voor de grondwaterdynamiek in de polder zijn deze veranderingen ook in het model meegenomen. Er is gebruik gemaakt van initiële klimaatverandering simulaties, uitgevoerd in opdracht van RIZA, om de rivierwaterstanden in de Waal en de Maas te simuleren. Uit deze eerste resultaten volgt dat de rivierwaterstanden niet dusdanig veranderen dat dit grote effecten heeft op de kweldynamiek in de polder Quarles van Ufford. Enige nuance met betrekking tot de betrouwbaarheid van deze voorspellingen is echter op zijn plaats en er komen nieuwe resultaten beschikbaar met een ander model in het voorjaar van 2007. Een groter effect heeft de lokale verandering in neerslag en referentie verdamping. De winters worden natter, de zomers droger en de referentie verdamping neemt flink toe, met name in de zomer en het najaar. Hierdoor is vooral in de zomer meer wateraanvoer nodig om gewasopbrengsten te garanderen. Er is meer water nodig om de peilen in de aanvoersloten te handhaven, omdat meer water naar de bodemkolommen zal infiltreren. Een opmerkelijk resultaat is ook dat de oppervlaktewater afvoer afneemt onder klimaat verandering. Waarschijnlijk drogen de bodem profielen in de zomer verder uit waardoor pas later in het seizoen significante afvoer wordt gegenereerd.

7.3 Aanbevelingen

Om het huidige model verder te verbeteren kunnen de volgende aanbevelingen in volgorde van belangrijkheid worden gedaan.

- Naast kwel en waterafvoer, spelen infiltratie en wateraanvoer een minstens zo belangrijke rol in de polder. Voor deze studie waren er geen wateraanvoer gegevens beschikbaar. De hoeveel kwel en infiltratie naar en van de bodemkolommen aan de onderrand wordt realistisch gesimuleerd. De werkelijk hoeveelheid water dat infiltreert vanuit het oppervlaktewater naar de bodemkolommen is onzeker en afhankelijk van het vochttekort in de bodem en de gebruikte infiltratieweerstanden. Om de infiltratieweerstanden te kalibreren zijn wateraanvoermetingen nodig.
- De transpiratie, evaporatie en interceptie concepten in SWAP verdienen nadere studie. Enerzijds lijkt de interceptie aan de hoge kant en anderzijds kunnen de verdampingskarakteristieken per landgebruik verder worden geoptimaliseerd. Vooral de fractie onverhard in stedelijk gebied resulteert in een mogelijke onderschatting van de totale verdamping in stedelijk gebied. Om de verdampingsconcepten te verbeteren zijn echter verdampingsmetingen nodig, bijvoorbeeld met behulp van Remote Sensing.
- Zandbanen spelen een belangrijke rol in de polder. Het voorkomen van een zandbaan leidt tot een toename van de kwelintensiteit met een factor 10 (Heerwaarden et al., 2005). In het huidige model lijken het effect van de zandbanen op de kwelintensiteiten enigszins onderschat te zijn.
- Er zou een gedetailleerd vergelijk en analyse van de gemeten en gesimuleerde afvoeren moeten worden uitgevoerd. Er waren nu maar gegevens beschikbaar voor één jaar (2002) en het verdient aanbeveling om een meerjarige reeks op verschillende locaties in het gebied te analyseren. Daarnaast moet een onderzocht worden wat de oorzaak is van de structurele onderschatting van de totale afvoer bij het hoofdgemaal van de polder. De oplossing kan gezocht worden in de volgende richtingen:
    - De peilen in de bodemkolommen wordt gehandhaafd, maar er wordt op dit moment geen water ingelaten van buiten het gebied in het oppervlaktewatersysteem, omdat er geen gegevens beschikbaar zijn. In de praktijk is dit echter wel het geval. Ingelaten water wordt nooit voor de volle 100% gebruikt en een deel wordt mogelijk gebruikt voor doorspoeling en peilhandhaving. Door het waterschap wordt nagegaan of er in de zomer daadwerkelijk water wordt uitgemalen door het hoofdgemaal.
    - Aanpassingen in verdamping en infiltratie parameterisatie
    - Verandering in Maaskwel door het lokaal verkleinen van de afstand tot de rivier ten gevolgen van plassen in de uiterwaarden.

Naast deze concrete aanbevelingen om het model verder te verbeteren zijn er ook een concreet aantal ideeën om de resultaten en methodiek toegankelijk te maken voor verder gebruik en voor toekomstige toepassingen.

- Het instrument is nu opgezet voor de Quarles van Ufford polder, maar zou ook relatief eenvoudig kunnen worden opgezet voor de andere delen van het beheersgebied van het

waterschap; Alblasserwaard, Vijfherenland, Alm en Biesbosch, Beneden-Linge en Bommelwaard.

- In de huidige studie is alleen gekeken naar de effecten van het KNMI'06 W+ scenario op de hydrologie. Deze analyse was vooral uitgevoerd om te demonstreren dat FutureViewR ingezet kan worden voor het evalueren van klimaatverandering. Er wordt echter altijd benadrukt dat beleid moet afgestemd worden op de totale set van klimaatscenario's. Het is daarom aan te bevelen om alle vier KNMI'06 scenario's door te rekenen.
- Het waterschap heeft interesse in hoe de aanvoer van water zal moeten veranderen ten gevolge van de klimaatverandering. Met de huidige analyse is duidelijk geworden dat de wateraanvoerbehoefte in de zomer sterk zal toenemen door (i) minder neerslag, (ii) lagere rivierwaterstanden en dus minder kwel en (iii) hogere referentieverdamping. Om duidelijk te maken waar de knelpunten zich bevinden en welke hoeveelheden waar in het gebied noodzakelijk zijn om de landbouwproductie minimaal te handhaven op het huidige niveau is verdere studie nodig. Het instrument is uitermate geschikt om deze vragen te beantwoorden.
- Het BSIK LANDS project richt op het ontwikkelen van landgebruikscenario's onder klimaatverandering in Nederland. Het project laat zien hoe de ruimtelijke inrichting van Nederland gaat verandering als gevolg van klimaatverandering op een resolutie van 100 x 100 m^2. Eén van de proefgebieden wat betreft water is de polder Quarles van Ufford. Aangezien FutureViewR een ruimtelijk gedifferentieerd landgebruik schematisatie heeft, is het goed inzetbaar om de veranderingen in hydrologie ten gevolge van zowel klimaatverandering als ruimtegebruik te kwantificeren. Het verdient dan ook aanbeveling hierop aan te sluiten.
- Door de ministeries van LNV, VROM en RWS wordt het landelijke mestbeleid geëvalueerd in het project "Monitoring Stroomgebieden". De polder Quarles van Ufford is hierbij een proefgebied en er zijn eveneens hydrologische modelberekeningen voor de polder uitgevoerd en daarnaast is er ook een oppervlaktewatermodel gebouwd. Om de kwaliteit van beide modellen te verbeteren is een vergelijk van de resultaten van beide studies wenselijk. Voor een vaste periode, bijvoorbeeld 1995-2000, zouden de maandelijkse waterbalansen vergeleken kunnen worden voor zowel de bodemkolommen, het oppervlaktewatersysteem en de gehele polder als totaal.
- Kalibratie van hydrologische modellen wordt normaal gesproken bewerkstelligd door gemeten en berekende afvoeren met elkaar te vergelijken op een beperkt aantal locaties in een gebied. Vaak is dit een moeizaam proces omdat een afvoer op een bepaalde locatie de resultante is van een groot aantal hydrologische processen en omdat er meerdere parameter combinaties mogelijk zijn die tot hetzelfde resultaat leiden. Een alternatief is om gebruik te maken van ruimtelijk gedifferentieerde opnamen van de actuele verdamping. Het SEBAL algoritme[2] is ontwikkeld en op een groot aantal plekken in Nederland en de wereld toepast om actuele verdamping uit radiometrische gegevens van satellieten af te leiden. FutureWater heeft goede ervaring met het gebruik van tijdseries van deze verdampingsbeelden in de kalibratie van hydrologische modellen. Deze methodiek zou uitstekend kunnen worden toepast in het waterschap Rivierenland waar het oppervlakte watersysteem complex is en waar metingen van tijdseries van afvoeren niet direct voor handen zijn.

[2] http://www.waterwatch.nl

8 Referenties

Cultuurtechnische Vereniging. 1988. Cultuur technisch vademecum. Utrecht

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.

Droogers, P. en Hurk, B. van den. 2006. Waterbeheer en de nieuwe KNMI klimaatscenario's. H_2O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer 12: 25-28.

Ernst, L.F. 1956 Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross sections. Neth. J.Agr. Scí. 4: 126-131.

Feddes R.A., P.J. Kowalik, H. Zarandy. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, Nederland.

Hooghoudt, S.B. 1940. Algemene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel lopende drains, greppels, sloten, en kanalen. Versl. Lanbouwk. Onderz. 46(14). Algemene Landsdrukkerij, s'-Gravenhage, Nederland. 193 pp

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.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

Heerwaarden, C.C. van; Droogers, P. en Loeve, R. 2005. Kwel en wegzijging langs de grote rivieren. Een nieuwe modelmatige aanpak. BSIK project Klimaat voor Ruimte. FutureWater rapport, Wageningen, 55p

KNMI, 2003. De toekomst van het klimaat in Nederland 2003.

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.

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.

Oreskes, N. 2004. The Scientific Consensus on Climate Change. Science, Vol 306, Issue 5702, Page 1686.

van Deursen, W., 2002. Klimaatveranderingen in de stroomgebieden van Rijn en Maas. Carhago Consultancy.

Van den Hurk, B., Klein Tank, A. en Bessembinder, J. 2006. Nieuwe klimaatscenario's beter onderbouwd door het KNMI. H2O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer 12:8-9.

Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, WJ.M. de Groor en J. Stoke. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153. Wageningen, Nederland.