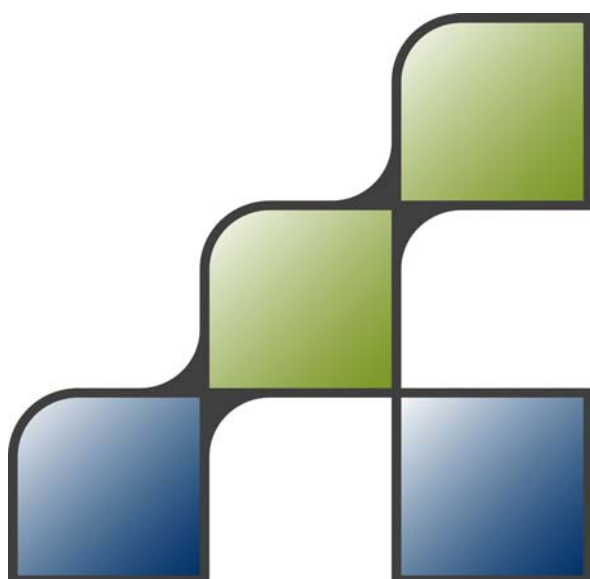


# Uitbreiding modelinstrumentarium en scenario analyse Quarles van Ufford





# Uitbreiding modelinstrumentarium en scenario analyse Quarles van Ufford

februari 2009

## **Opdrachtgever**

Waterschap Rivierenland  
Co-financiering BSIK Klimaat voor Ruimte

## **Begeleiders**

H. Niewold  
G. van den Eertwegh

## **Auteurs**

E. Hermans  
P. Droogers  
W.W. Immerzeel

## **FutureWater Rapport 81**

## **FutureWater**

Costerweg 1G  
6702 AA Wageningen  
The Netherlands

+31 (0)317 460050

[info@futurewater.nl](mailto:info@futurewater.nl)

[www.futurewater.nl](http://www.futurewater.nl)



Dit rapport bevat de resultaten van een vervolgonderzoek met het modelinstrumentarium FutureViewR voor de polder Quarles van Ufford. Het bestaande model is op een aantal punten aangepast om de hydrologische processen beter te simuleren. Tevens is met het model onderzocht in hoeverre het gebruik van regenradar effect heeft op de hydrologie. Tenslotte is het verbeterde model gebruikt om een tweetal gecombineerde klimaat- en landgebruiks-scenario's voor de toekomst door te rekenen. Waterschap Rivierenland heeft opdracht gegeven voor deze studie. Co-financiering vindt plaats vanuit het BSIK programma Klimaat voor Ruimte.

FutureWater heeft de studie uitgevoerd, maar dit kon alleen door de open discussie en prettige samenwerking met medewerkers van het waterschap. We willen de begeleidingscommissie bestaande uit Heino Niewold en Gé van den Eertwegh hartelijk danken voor hun waardevolle inbreng. Kenmerkend voor onze bijeenkomsten waren inhoudelijke discussies waarin door iedereen actief meegedacht werd. Dat creëert een prettige sfeer en komt het resultaat ten goede.

Ellen Hermans  
Peter Droogers  
Walter Immerzeel  
Februari 2009





<b>Voorwoord</b>	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2 Verbeteringen Modelinstrumentarium</b>	<b>11</b>
2.1 Verdamping	11
2.1.1 Theorie	11
2.1.2 Gevoeligheidsanalyse	11
2.1.3 Modelaanpassing	16
2.2 Stedelijk gebied	18
2.2.1 Theorie en Modeltoepassing	19
2.2.2 Gevoeligheidsanalyse en kalibratie	20
2.2.3 Implementatie	23
2.3 Kwel en wegzijging	24
2.3.1 Ontwikkeling van de kwelmodule	24
2.3.2 Gevoeligheidsanalyse met betrekking tot zandbanen	25
2.3.3 Vergelijking met uitkomsten grondwatermodel	27
2.3.4 Modelaanpassing	28
2.4 Wateraanvoer, Infiltratie en Drainage	33
2.4.1 Analyse	33
2.4.2 Modelaanpassing	34
2.5 Oppervlaktewater	37
2.5.1 Aanpassing oppervlaktewatermodule	37
2.5.2 Resultaat oppervlaktewatermodule	38
2.5.3 Waterbalans open water	39
<b>3 FutureViewR versus meetgegevens</b>	<b>41</b>
3.1 Waterbalans op jaarbasis	41
3.2 Waterbalans op maandbasis	42
3.2.1 Verdamping	42
3.2.2 Kwel en Wegzijging	43
3.2.3 Infiltratie, drainage en oppervlakte-afvoer	44
<b>4 Regenradar</b>	<b>47</b>
4.1 Theorie en Data	47
4.2 Modelinvoer: Neerslag Megen versus Radar	47
4.3 Effect op hydrologische processen	51
4.3.1 Verdamping	51
4.3.2 Kwel en Wegzijging	53
4.3.3 Drainage en infiltratie	53
4.3.4 Oppervlakte-afvoer en riooloverstort	55



4.3.5	Afvoer	57
<b>5</b>	<b>Klimaat en Landgebruik scenario's</b>	<b>59</b>
5.1	Scenario's en modelinvoer	59
5.1.1	KNMI'06 Scenario's	59
5.1.2	Rivierwaterstanden	63
5.1.3	Landgebruik	65
5.2	Resultaten	68
5.2.1	Algemeen	68
5.2.2	Verdamping	70
5.2.3	Kwel en wegzijging	73
5.2.4	Drainage en infiltratie	77
5.2.5	Runoff	80
5.2.6	Afvoer	82
5.2.7	Grondwater Regime	82
5.2.8	Landbouwopbrengsten	85
<b>6</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>89</b>
6.1	Conclusies	89
6.1.1	Modelverbetering	89
6.1.2	Regenradar en effecten op de hydrologische processen	90
6.1.3	Klimaat- en landgebruik scenario's voor 2050 en de effecten op hydrologische processen	90
6.2	Aanbevelingen	91
	<b>Literatuur</b>	<b>93</b>
	<b>Bijlage I: Achtergrond bij kalibratie</b>	<b>95</b>





# Samenvatting

De afgelopen jaren hebben het Waterschap Rivierenland en FutureWater het modelinstrumentarium FutureViewR ontwikkeld. FutureViewR is een modellenlijn uitgezet om meer inzicht te verkrijgen in hydrologisch processen die verder gaan dan de klassieke aanpak gericht op open water alleen. Onderwerpen als kwel en wegzijging van en naar de grote rivieren, droogte, wateroverlast en wateraanvoer zijn bestudeerd voor zowel de huidige situatie als voor het toekomstige klimaat. De polder Quarles van Ufford is hierbij gebruikt als demonstratiegebied.

In de huidige studie is het modelinstrumentarium op een aantal punten verbeterd. Daarnaast is onderzocht in hoeverre het gebruik van regenradar in plaats van puntgegevens met betrekking tot neerslag effect heeft op de gesimuleerde hydrologische processen. Ten slotte is met het verbeterde FutureViewR een tweetal klimaat- en landgebruikscenario's voor de toekomst doorgerekend.

Uit eerdere studies is gebleken dat de verdamping mogelijkwerwijs werd overschat. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen welke parameters van het door FutureViewR gebruikte SWAP-model het meest bepalend zijn voor de berekening van de verdamping. De potentiële verdamping is naar beneden toe bijgesteld door het aanpassen van gewasfactoren. De interceptiecoëfficiënt is op basis van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse aangepast om reële waarden voor de interceptieverdamping te verkrijgen.

De simulatie van oppervlakte-afvoer en verdamping in stedelijk gebied is verbeterd. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij de volgende SWAP parameters het meest gevoelig bleken voor deze hydrologische processen: de doorlatendheid van de bovengrond, de 'Leaf Area Index' (LAI) en de bodemverdampingscoëfficiënt. Deze parameters zijn aangepast. Hierbij is gebruik gemaakt van afzonderlijke SWAP-kolommen voor verhard en onverhard oppervlak en een oppervlaktemiddeling (aangenomen is dat 70% van het stedelijk gebied verhard is). De kalibratie heeft geleid tot een veel realistischere simulatie van hydrologische processen in stedelijk gebied. De meeste neerslag verlaat nu snel het systeem via oppervlakte-afvoer. Voor kalibratie gebeurde dit nog vertraagd via de bodem.

Met betrekking tot kwel en wegzijging is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd in relatie tot het voorkomen van zandbanen. De door FutureViewR berekende kwel- en wegzijgingshoeveelheden zijn vergeleken met die van een recent uitgevoerde grondwatermodellering. Uiteindelijk is de kwelfactor aangepast door uit te gaan van meer realistische doorlatendheden van de deklaag en de aquifer. Bovendien is de zogenoemde zandbaanconstante afhankelijk gemaakt van de diepte waarop de zandbaan voorkomt. Als gevolg van deze aanpassingen is de netto kwel met ongeveer 25% toegenomen. Bovendien wordt nu ook op grotere afstand van de rivier kwel en wegzijging berekend. Dit komt overeen met de ervaring van Waterschap Rivierenland.

De infiltratie- en drainageweerstanden zijn verlaagd. Dit leidt er met name toe dat in overeenstemming met de ervaring van het waterschap in de zomer meer water infiltreert. Berekening is vooralsnog niet opgenomen in FutureViewR. De oppervlaktewatermodule is aangepast. De balanstermen zijn verbeterd, waterinlaat is opgenomen en onder aanname van



een vaste rioolcapaciteit riool is rioolwateroverstort opgenomen. Het resultaat is dat afvoerpieken en de basisafvoer beter gesimuleerd worden.

De waterbalans volgens het op bovenstaande punten aangepaste FutureViewR-model is vergeleken met de waterbalans op basis van metingen. Met de verbeterde oppervlaktewater-module kon nu ook een aparte balans voor het open water opgesteld worden. De modelverbeteringen hebben ertoe geleid dat de simulatie van hydrologische processen goed overeen komt met metingen.

Het gebruik van regenradar in plaats van puntgegevens met betrekking tot neerslag is geanalyseerd voor het jaar 2004. De jaarsom van de neerslag is volgens radar iets lager dan volgens station Megen. Op bepaalde dagen kunnen de verschillen groot zijn. Dit betreft met name de hevige convectieve buien in de zomer. Een gunstigere neerslagverdeling leidt ertoe dat er meer verdamping plaatsvindt als regenradar als modelinvoer wordt gebruikt. Er is geen effect op kwel en wegzijging. Zowel de drainage als de infiltratie is lager bij het gebruik van de regenradar. Hoewel de runoff op jaarbasis nauwelijks wijzigt zijn de verschillen op maandbasis groter als gevolg van verschillen in neerslagintensiteit. De oppervlakte-afvoer in landelijk gebied is met neerslag volgens station Megen duidelijk hoger. Dit komt omdat radar minder intense buien meet boven kleigebied waar de infiltratiecapaciteit lager is. De hoeveelheid riooloverstort varieert ruimtelijk bij gebruik van regenradar. De gesimuleerde afvoer wijzigt met name voor piek-situaties. Neerslag volgens radarbeelden geeft voor 2004 geen betere afvoersimulatie dan neerslag volgens station Megen.

Met het verbeterde model zijn twee integrale toekomstscenario's doorgerekend met als zichtjaar 2050. Het betreft klimaatverandering volgens het G+ en het W+ scenario van het KNMI en de hiermee samenhangende wijziging in rivierwaterstanden en landgebruik. In de zomer neemt de neerslag volgens de toekomstscenario's af terwijl de neerslag in de winter juist toe zal nemen. De potentiële verdamping neemt toe. Het W+ scenario is extremer dan het G+scenario. Het effect van de toekomstscenario's op hydrologische processen is voor een gemiddeld jaar niet extreem groot. Ondanks de hogere potentiële verdamping blijft de actuele verdamping nagenoeg gelijk. Vooral in de zomer zal meer wateraanvoer nodig zijn om gewasopbrengsten te garanderen. In de winter en het voorjaar neemt de kwel onder invloed van de stijgende rivierwaterstanden toe. In de zomer zijn de rivierwaterstanden lager en neemt de kwel af. In augustus en september van een gemiddeld jaar vindt er zelfs een omslag plaats van netto kwel in de huidige situatie tot netto wegzijging voor het W+ scenario. Als gevolg hiervan neemt de infiltratie in de zomer toe. De toename van de nu reeds hoge kwel in een extreem natte winter zal rond 2050 aanzienlijk toenemen in een brede strook langs de rivieren. Door een toename van extreme buien neemt de runoff en de piekafvoer toe. Opvallend is dat in de toekomst de drainage en de afvoer in het najaar af zal nemen ten opzichte van de huidige situatie. Het neerslagoverschot wordt in deze maanden niet afgevoerd maar gebruikt om het grondwater en het bodemvocht aan te vullen. Volgens de toekomstscenario's is de afvoer pas halverwege december weer op het niveau van de huidige situatie.

Op basis van deze studie zijn een aantal concrete aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek. FutureViewR is voldoende ontwikkeld om toegepast te worden in andere gebieden.



# 1 Inleiding

De afgelopen jaren hebben het Waterschap Rivierenland en FutureWater een modellenlijn uitgezet om meer inzicht te verkrijgen in hydrologisch processen die verder gaan dan de klassieke aanpak gericht op open water alleen. Onderwerpen als kwel en wegzijging naar de grote rivieren, droogte, wateroverlast op het land en wateraanvoer zijn bestudeerd met als drijvende kracht klimaatverandering. De polder Quarles van Ufford is hierbij gebruikt als demonstratiegebied (Figuur 1). Hier volgt eerst een korte samenvatting van deze ontwikkelingen en een analyse van de benodigde extra analyses wat vervolgens leidt tot de doelstelling van de huidige studie.

In 2005 is het FutureView model opgezet voor de polder Quarles van Ufford. FutureView is gebaseerd op het SWAP model gekoppeld aan een GIS. Per peilgebied werd een SWAP model opgezet en geparameteriseerd. Vervolgens is dit model uitgebreid met een kwelmodule, waarbij de kwel in de polder een functie werd van de afstand tot de Maas en Waal, de rivierwaterstanden, en de aanwezigheid van zandbanen (Heerwaarden *et al.*, 2005).

Dit model vormde de basis voor verdere ontwikkelingen in 2006 van FutureView naar FutureViewR. De grootse aanpassing was dat het ruimtelijke detail sterk verbeterd werd. In plaats van peilgebieden is er gebruik gemaakt van een regelmatig raster van 250 bij 250 meter. Voor elke rastercel is vervolgens een SWAP model geparameteriseerd en gelinked aan de kwel module. Op die manier wordt gerekend met bijna 1900 rekeneenheden in plaats van 190 peilgebieden. Daarnaast is een eenvoudige oppervlaktewater module ontwikkeld. Elke rastercel heeft een link met het oppervlaktewater en het water wordt door de polder getransporteerd tot het hoofdgemaal. Ook is het mogelijk om water in te laten in een door een gebruiker te specificeren waterloop. Omdat deze uitbreidingen een grote toename in gegevensstroom betekent, is er gebruik gemaakt van een MS SQL Server database waar zowel de invoer als de uitvoer van het model worden opgeslagen. Een user interface zorgt voor de communicatie tussen model en database (Immerzeel *et al.*, 2007).

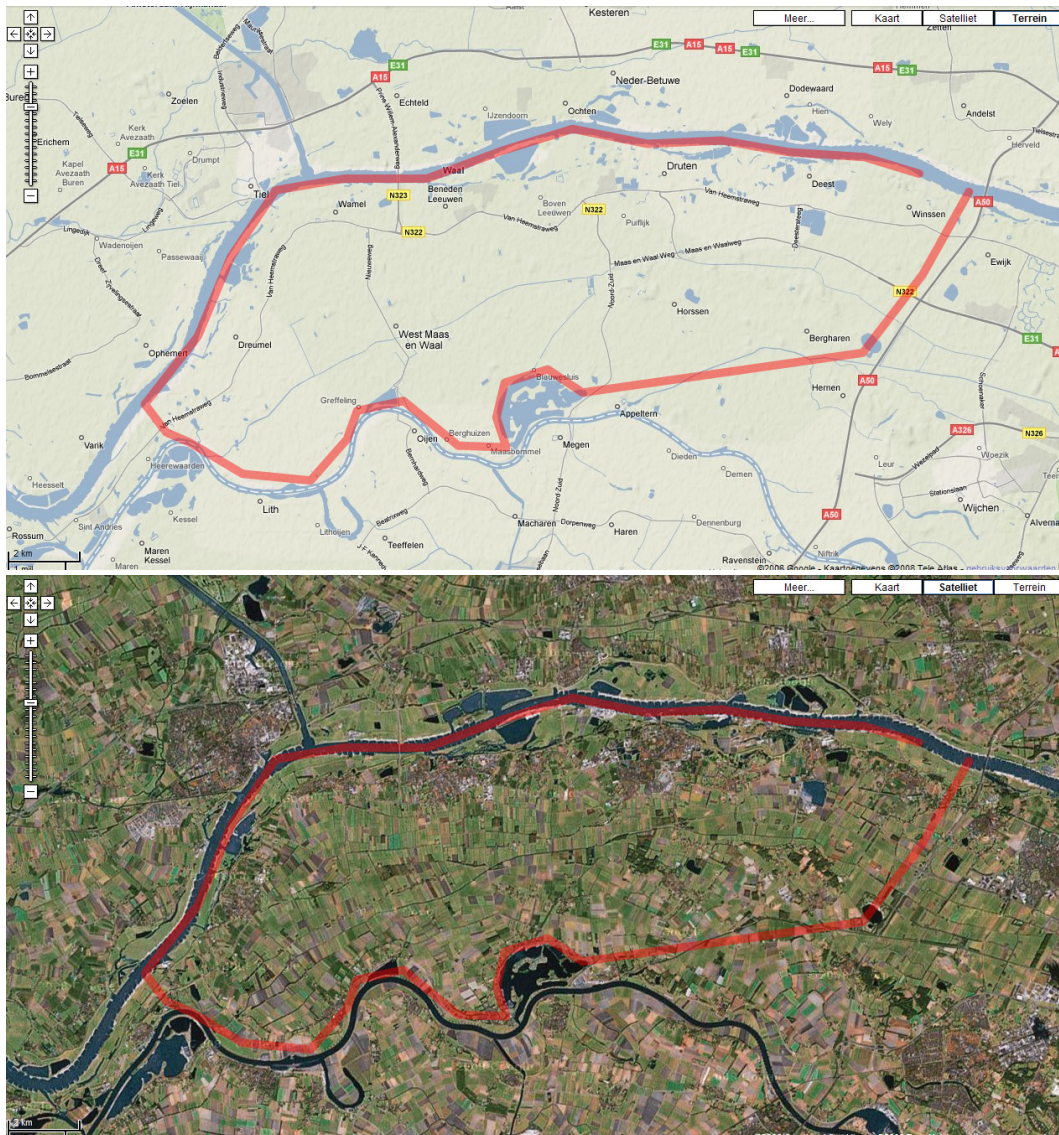
Vervolgens is in 2007 een vergelijking gemaakt tussen de modelstudie van Quarles van Ufford met FutureViewR en een door Alterra uitgevoerde studie "monitoring stroomgebieden" in dezelfde polder. De verschillende maandelijkse waterbalans componenten van 1995-2000 zijn met elkaar vergeleken en geanalyseerd. Tevens zijn er aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek (Immerzeel, 2007a).

De huidige studie gaat verder met de aanbevelingen uit de eerdere studies. De doelstellingen van dit project zijn:

- Het verbeteren en verder uitbouwen van het FutureViewR modelinstrumentarium met als doel om alle componenten van de waterbalans nauwkeuriger te beschrijven.
- Het analyseren van het effect op de hydrologische processen bij gebruik van regenradarbeelden in plaats van puntwaarnemingen voor neerslag.
- Het doorrekenen en analyseren van klimaat- en landgebruikscenario's voor de toekomst.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op verbetering van het model instrumentarium. Hoofdstuk 3 vergelijkt de waterbalans volgens het verbeterde model met metingen. Hoofdstuk 4 behandelt het gebruik van regenrader. In hoofdstuk 5 volgt de scenario analyse. Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies en aanbevelingen.





Figuur 1. Locatie van het gebied Quarles van Ufford (bron: Google Maps).





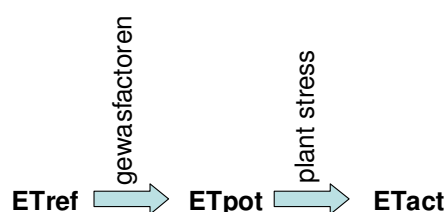
## 2 Verbeteringen Modelinstrumentarium

### 2.1 Verdamping

#### 2.1.1 Theorie

Verdamping wordt gezien als een belangrijke term van de waterbalans, maar tegelijkertijd is dit ook een term waar vaak weinig informatie of metingen beschikbaar voor zijn. Uit eerdere studies is gebleken dat de verdamping mogelijk wordt overschat voor Quarles van Ufford door het SWAP model zoals gebruikt in FutureViewR. Het is daarom van belang om te kijken welke parameters het meest bepalend zijn voor de berekening van de verdamping, zodat duidelijk wordt met welke parameters de verdamping gekalibreerd kan worden. Aan de hand van de meest gevoelige parameters zou dan de verdamping nauwkeuriger kunnen worden gesimuleerd. Uiteraard zijn hiervoor dan metingen nodig, afkomstig van waterbalansen, remote sensing of meteorologische metingen zoals de Eddy-Correlatie methode.

De algemene term verdamping leidt vaak tot verwarring en wordt gebruikt voor verschillende termen. De eerste onderscheiding die moet worden gemaakt is of er gerefereerd wordt aan de actuele- of de potentiële- of de referentieverdamping. De referentieverdamping wordt in Nederland bepaald met behulp van de Makkink methode. Deze referentieverdamping kan vervolgens met behulp van de gewasfactoren omgezet worden naar de potentiële verdamping. Afhankelijk van de vochttoestand (en eventuele ziekten en plagen) volgt de actuele verdamping. Schematisch:



Een ander belangrijk onderscheid waar de algemene term “verdamping” naar verwijst, is van welk oppervlak dit komt. De belangrijkste zijn: open water, verhard (stedelijk) gebied, plant, kale grond, interceptie (water op bladeren). In deze paragraaf richten we ons alleen op de drie laatste componenten. De stap van ETpot naar EAct wordt bepaald door de vochttoestand van de bodem. Deze kan zowel te droog als te nat (eigenlijk zuurstoftekort) zijn voor plantenwortels om voldoende water op te nemen wat leidt tot niet optimale verdamping (Figuur 3). In SWAP worden deze drie termen berekend volgens het schema dat te zien is in Figuur 4.

#### 2.1.2 Gevoeligheidsanalyse

Gebaseerd op bovenstaande zijn er een aantal parameters die de grootte van de verschillende verdampingscomponenten bepalen en die getest zijn op hun gevoeligheid. In totaal zijn er 9 invoerparameters getest die alle in de SWAP crop file zijn gedefinieerd (Tabel 2). Uiteraard zijn er vele andere parameters die uiteindelijk de grootte van de verdamping bepalen (neerslag,



referentieverdamping, drainage, irrigatie etc.), maar deze zijn niet gewas specifiek en daarom hier niet relevant.

Een tweetal SWAP modellen uit Quarles van Ufford is gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse van de verdamping (Figuur 2). De belangrijkste eigenschappen van deze modellen zijn te zien in Tabel 1. Voor de standaard parameter waarden zoals deze momenteel in de database staan, zijn de drie vormen van verdamping te zien voor de twee modellen in Figuur 5. Duidelijk is dat voor plot 959 de totale actuele verdamping lager is dan voor plot 1292 (plot 959: 379 mm; plot 1292: 461 mm). Dit verschil wordt alleen veroorzaakt door de gewastranspiratie: de interceptie- en bodemverdamping zijn precies gelijk. Aangezien de gewasgegevens voor de twee plots precies gelijk zijn, moet het verschil komen uit de specifieke eigenschappen in bodem, kwel en wegzijging en hoogte ligging. Plot 959 is kleilig terwijl 1292 lemiger is. Daarnaast heeft plot 959 ook een iets grotere drooglegging.

Voor elk van de parameters die in Tabel 2 staan genoemd, zijn de minimale en maximale waarden genomen, die binnen de realistische grenzen liggen. Vervolgens zijn voor elke parameter vijf SWAP modellen gebouwd: (i) minimale waarde, (ii) gemiddelde van minimale en standaard waarde, (iii) standaard waarde, (iv) gemiddelde van standaard en maximale waarde, (v) maximale waarde. In totaal zijn er dus 90 SWAP modellen gebouwd en gerund (2 bodems, 9 parameters, 5 parameter waarden). Om deze 90 modellen te simuleren is gebruik gemaakt van de SENSAN software, wat onderdeel is van het PEST parameters optimalisatie tool (Dorothy, 2004). Voor elk van deze modellen is de gemiddelde interceptie-, bodem-, en gewasverdamping over een periode van 12 jaar (1993-2004) bepaald.

In Figuur 6 is een voorbeeld te zien van deze analyse voor één parameter: de Leaf Area Index. Uit dit voorbeeld blijkt dat de LAI alle drie de componenten van de verdamping beïnvloed, met als netto resultaat dat de totale verdamping toeneemt. Wel is het duidelijk dat bij hogere LAI's de toename beperkter wordt.

#### **Voor de andere parameters is de invloed op de verdamping weergegeven in**

Tabel 3 voor plot 959 en Tabel 4 voor plot 1292. Puntsgewijs kunnen de volgende conclusies uit deze resultaten worden getrokken:

- De parameters kunnen de totale verdamping sturen tussen ongeveer +255 en -140 mm per jaar. Hierbij is uitgegaan van realistische parameter waarden.
- De invloed is in dezelfde orde van grootte voor de twee plots. Alleen de invloed van de reductieparameters onder natte omstandigheden (HLIM1 en HLIM2) is groter op de wat nattere plot (959).
- Alleen de Leaf Area Index en de interceptie coëfficiënt (COFAB) hebben invloed op alle termen van de verdamping.
- De invloed van COFAB is primair op de interceptie gericht, maar doordat hierdoor de hoeveelheid regen die op de bodem valt verandert, worden ook de bodemverdamping en de gewastranspiratie beïnvloed.
- De gewasweerstand parameter RSC heeft geen invloed, omdat deze alleen gebruikt wordt als SWAP intern de referentieverdamping berekend. Voor de hier gebruikte modellen is uitgegaan van de opgegeven referentieverdamping.
- Een aantal van de geteste parameters zijn redelijk goed te meten of in te schatten: LAI, CF, RD. Voor de HLIM en COFAB parameters zijn weinig concrete metingen beschikbaar en zijn daarom het beste geschikt voor een eventuele kalibratie.
- Uit de analyses kan samenvattend de volgende kalibratie strategie worden afgeleid:
  - verhogen interceptie → verhogen COFAB



- verhogen transpiratie onder natte omstandigheden → verlagen HLIM1 en/of HLIM2
- verhogen transpiratie onder droge omstandigheden → verhogen HLIM4
- verhogen bodemverdamping → verlagen LAI (maar beïnvloed ook de andere verdampingstermen)

**Tabel 1. Belangrijkste eigenschappen van de twee SWAP modellen voor het testen van de verdamping.**

SWAP model nummer	959	1292
Gewas	gras	Gras
Bodem	klei	Leem
	(B11-O12)	(B9-O11)
Hoogte (m NAP)	4.52	5.68
Zomerpeil (m MV)	-0.92	-0.88
Winterpeil (m MV)	-0.52	-0.43

**Tabel 2. Parameters in SWAP crop file die verdamping beïnvloeden.**

Parameter	Standaard	Min	Max
LAI: Leaf Area Index (-)	3.0	2.0	4.0
CF: Gewas factor (-)	1.2	0.8	1.5
RD: Worteldiepte (cm)	30	10	40
HLIM1: Reductie (cm)	-10	0	-50
HLIM2: Reductie (cm)	-10	0	-50
HLIM3: Reductie (cm)	-250	-100	-1000
HLIM4: Reductie (cm)	-2500	-1000	-16000
RSC: Minimum gewasweerstand (s/m)	70	30	100
COFAB: Interceptie coëfficiënt (cm dag <sup>-1</sup> )	0.25	0.10	0.50

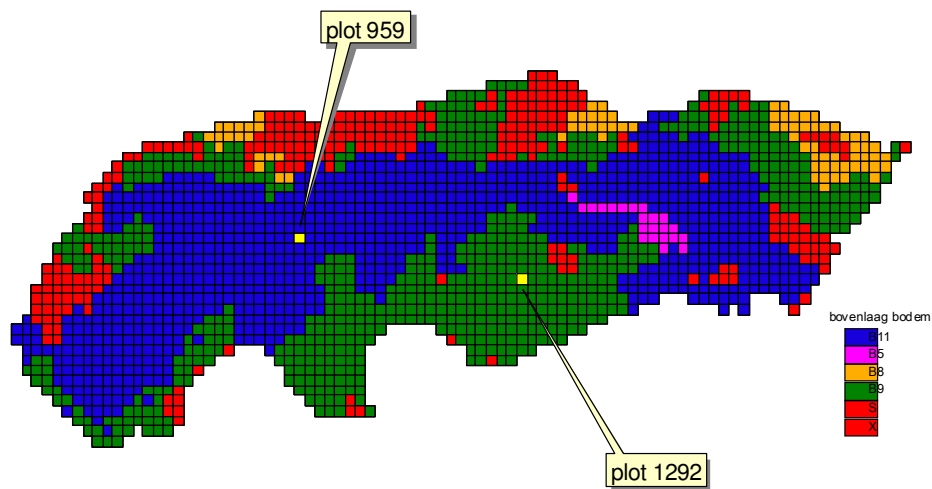
**Tabel 3. Invloed parameters op verdamping in mm per jaar voor plot 959. Aangegeven is het verschil tussen de hoogste en de laagste parameter waarden.**

	interceptie	transpiratie	verdamping	totaal
LAI	55	50	-79	26
CF	0	172	0	172
RD	0	67	0	67
HLIM1	0	-136	0	-136
HLIM2	0	-42	0	-42
HLIM3	0	15	0	15
HLIM4	0	55	-1	55
RSC	0	0	0	0
COFAB	112	-53	-2	58

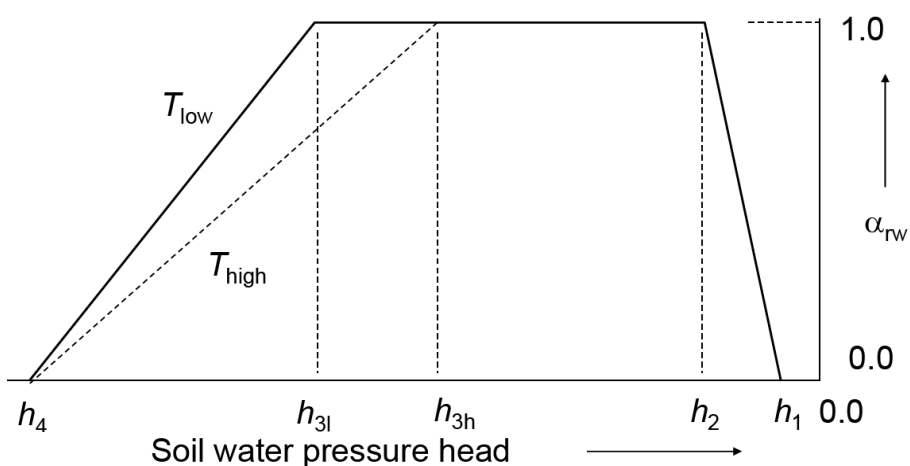


Tabel 4. Invloed parameters op verdamping in mm per jaar voor plot 1292. Aangegeven is het verschil tussen de hoogste en de laagste parameter waarden.

	interceptie	transpiratie	verdamping	totaal
LAI	55	63	-79	38
CF	0	255	0	255
RD	0	25	0	25
HLIM1	0	-61	0	-61
HLIM2	0	-15	0	-15
HLIM3	0	23	0	23
HLIM4	0	46	0	46
RSC	0	0	0	0
COFAB	112	-63	-2	48



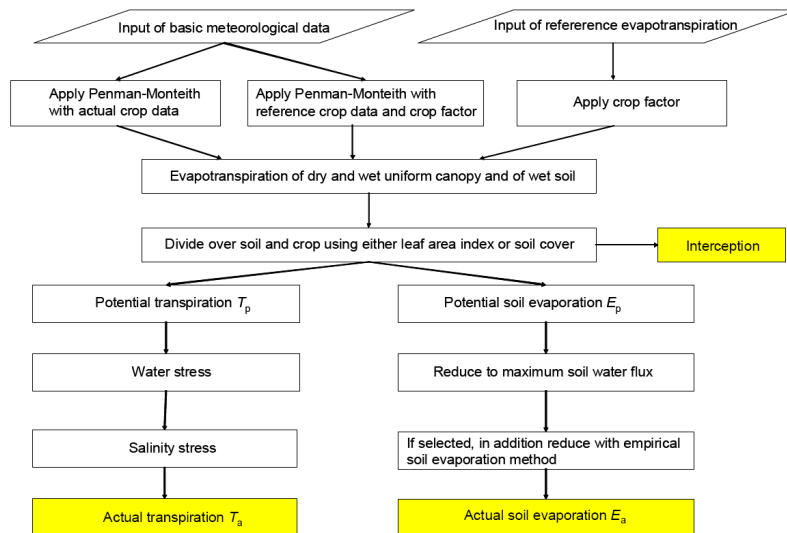
Figuur 2. Locatie van de twee SWAP modellen voor het testen van de verdamping.



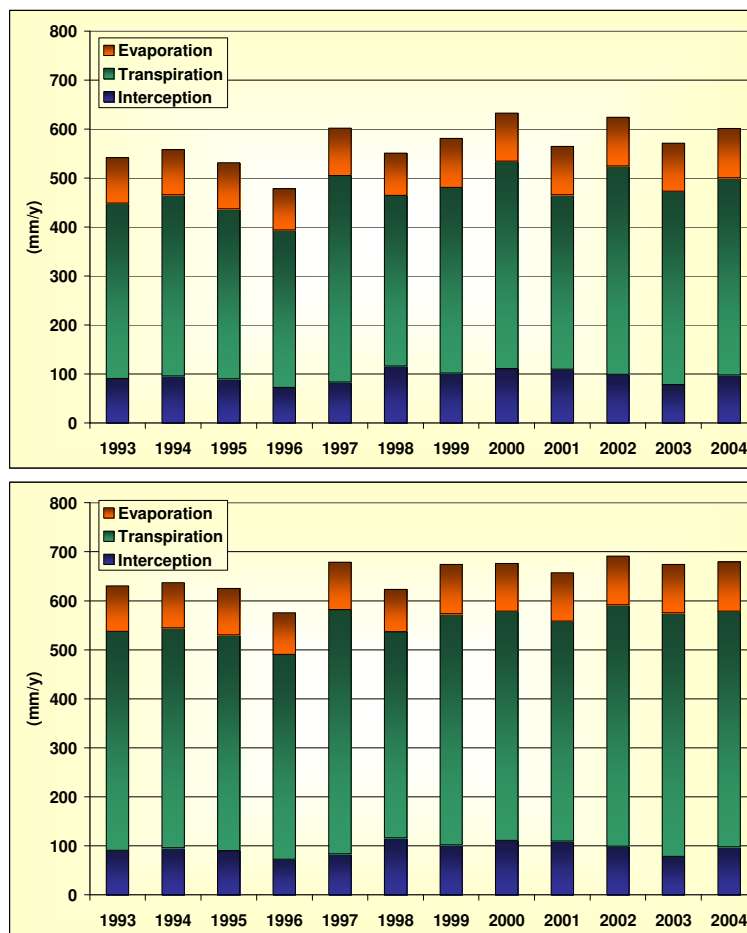
Figuur 3. Reductie coëfficiënt ( $\alpha_{rw}$ ) voor wortelopname als functie van de drukhoogte in de bodem (Feddes et al., 1978).





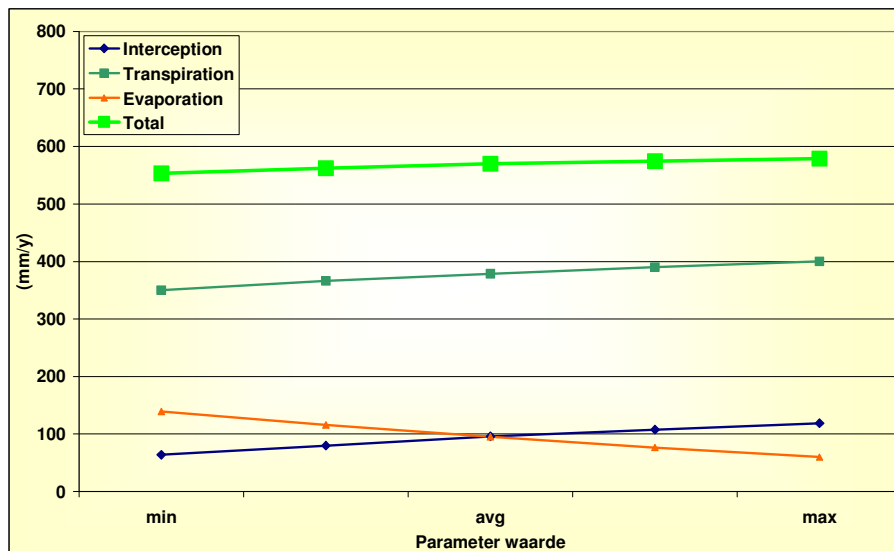


Figuur 4. Onderverdeling van de actuele verdamping in interceptie, plant en bodem (bron: Kroes et al., 2008).



Figuur 5. Termen van de verdamping bij huidige parameterwaarden (boven plot 959; onder plot 1292)

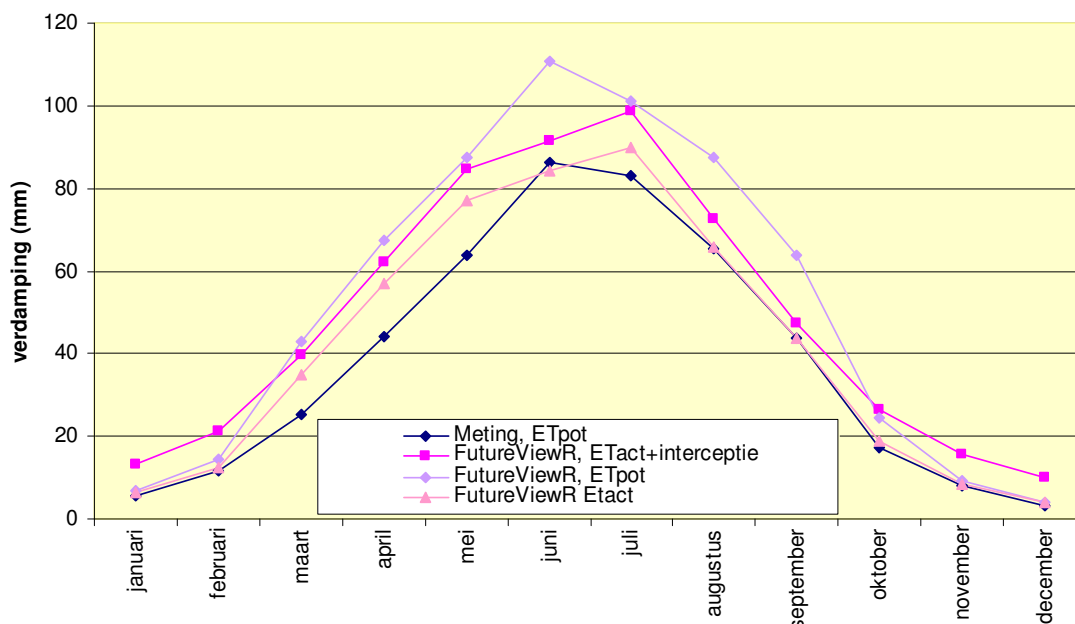




Figuur 6. Voorbeeld van de gevoeligheidsanalyse: parameter Leaf Area Index.

### 2.1.3 Modelaanpassing

In Bijlage I is de waterbalans volgens FutureViewR vergeleken met de waterbalans volgens metingen voor 2002. Figuur 7 geeft deze vergelijking op maandbasis weer met betrekking tot verdamping.



Figuur 7: Verdamping in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR.

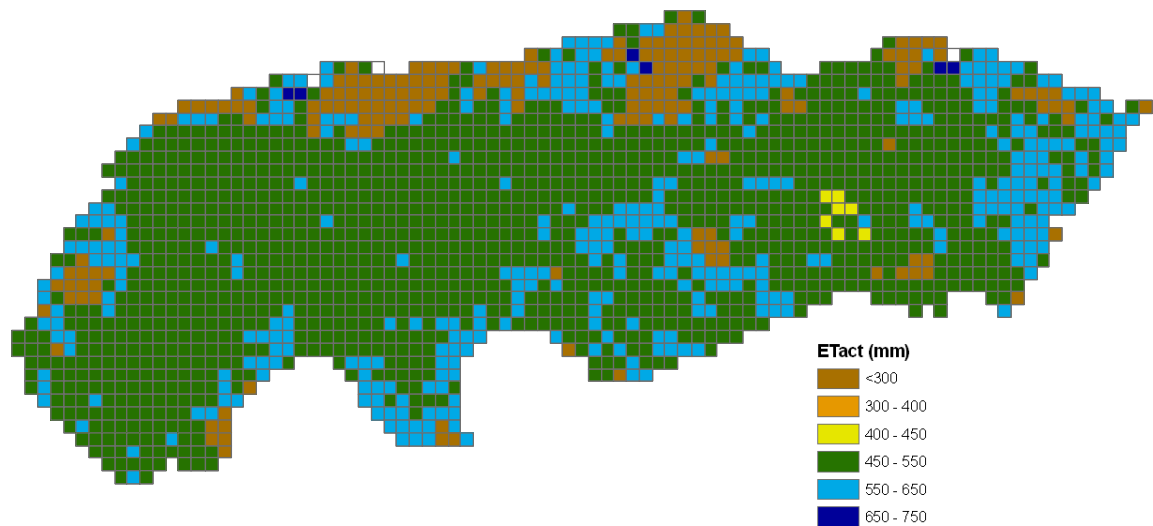
Uit deze figuur is op te maken dat de potentiële verdamping volgens FutureViewR veel hoger is dan de potentiële verdamping die is opgenomen in de waterbalans op basis van metingen. In beide gevallen is de potentiële verdamping berekend op basis van de referentieverdamping



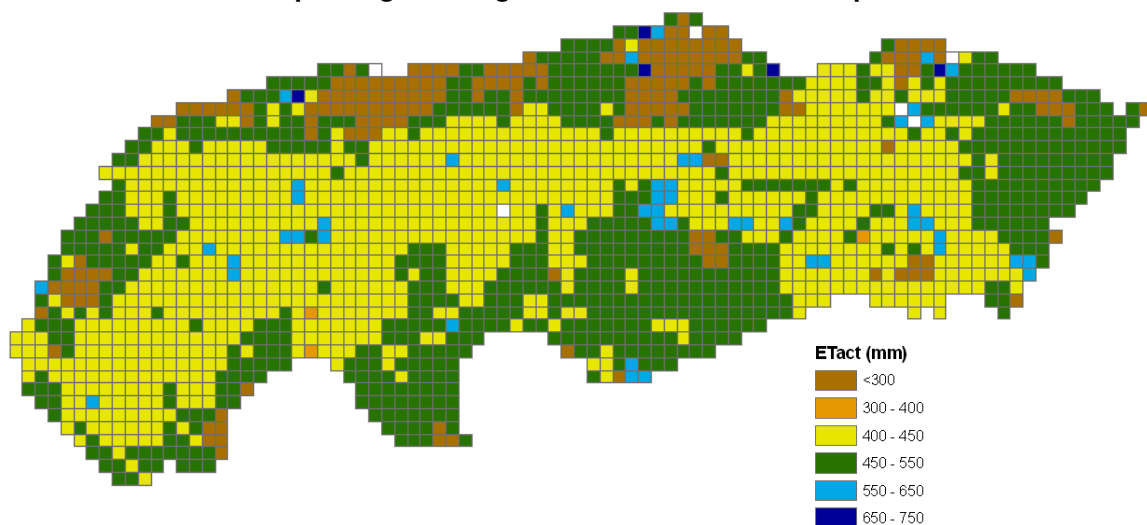
volgens Makkink en gewasfactoren. Echter, in de waterbalans op basis van metingen zijn gewasfactoren per decade per gewas gebruikt (Feddes, 1987) terwijl in FutureViewR de gewasfactor voor gras, akker en bos gelijk is en constant 1,2. Om de potentiële verdamping in FutureViewR beter te laten aansluiten bij deze metingen zijn de gewasfactoren in FutureViewR aangepast volgens Feddes (1987). Hierbij is voor akkerbouw uitgegaan van gemiddelde waarden van graan, maïs, aardappels en bieten.

Uit Figuur 7 is tevens op te maken dat FutureViewR de interceptieverdamping overschat. Op basis van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse is de interceptiecoëfficiënt aangepast van 0,25 naar 0,15 cm per dag.

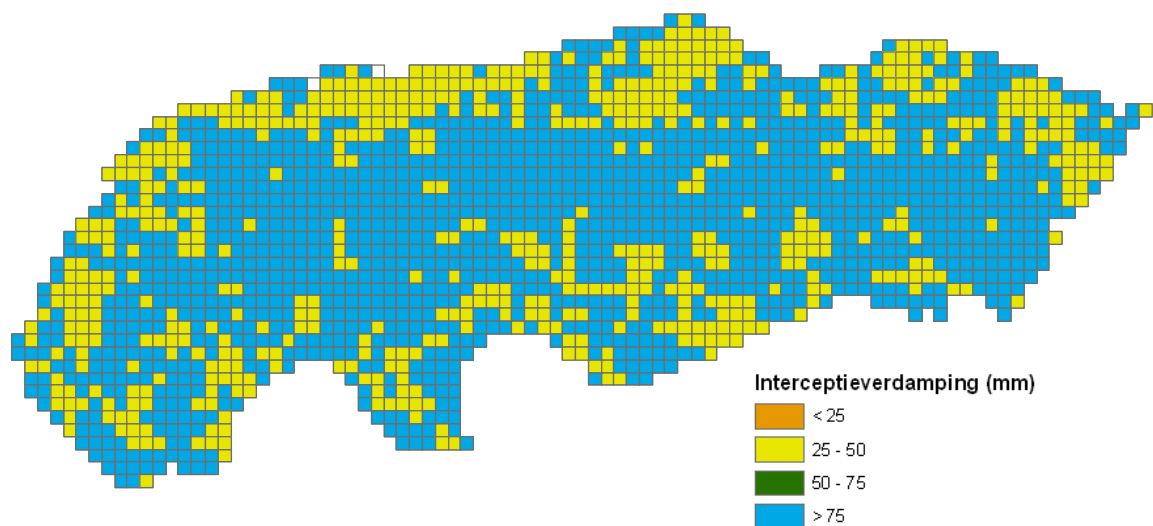
Het resultaat van deze aanpassingen is dat in 2002 de actuele evapotranspiratie gemiddeld met ruim 10% afneemt en de interceptieverdamping gemiddeld met 33%. Als gevolg van een verminderde verdamping daalt de infiltratie en stijgt de drainage. In hoofdstuk 3 wordt de maandelijkse waterbalans gepresenteerd. De hierna volgende figuren tonen ruimtelijk de veranderingen in actuele evapotranspiratie en interceptieverdamping voor de periode 2001 t/m 2004.



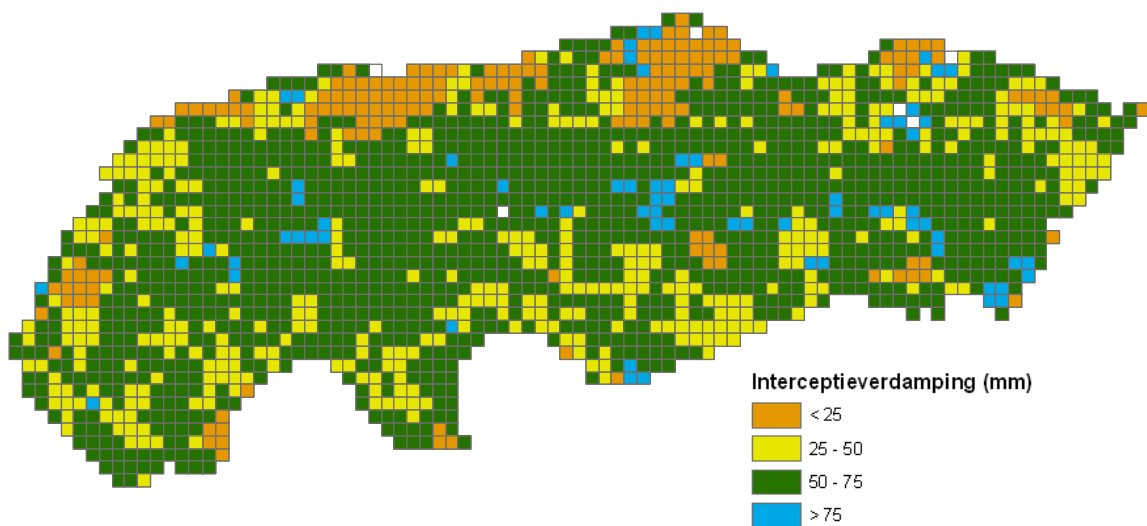
**Figuur 8: Gemiddelde jaarlijkse som van de actuele evapotranspiratie voor de periode 2001 t/m 2004 voor aanpassing van de gewasfactoren en de interceptiecoëfficiënt.**



**Figuur 9: Gemiddelde jaarlijkse som van de actuele evapotranspiratie voor de periode 2001 t/m 2004 na aanpassing van de gewasfactoren en de interceptiecoëfficiënt.**



**Figuur 10: Gemiddelde jaarlijkse som van de interceptieverdamping voor de periode 2001 t/m 2004 voor aanpassing van de interceptiecoëfficiënt.**



**Figuur 11: Gemiddelde jaarlijkse som van de interceptieverdamping voor de periode 2001 t/m 2004 na aanpassing van de interceptiecoëfficiënt.**

## 2.2 Stedelijk gebied

De ontwikkeling van het modelinstrumentarium voor de polder Quarles van Ufford is met name gericht geweest op het landelijk gebied. In deze paragraaf staat het verbeteren van de simulatie van stedelijk gebied centraal. Allereerst wordt ingegaan op de hydrologie van stedelijk gebied en hoe dit met SWAP gesimuleerd kan worden (§2.2.1). Uitgaande van één SWAP-kolom is een gevoeligheidsanalyse en een kalibratie uitgevoerd (§2.2.2). Ten slotte is de verbeterde parameterisatie van stedelijk gebied geïmplementeerd in FutureViewR (§2.2.2).



### 2.2.1 Theorie en Modeltoepassing

Stedelijk gebied is deels verhard en deels onverhard. Met betrekking tot het verharde deel wordt tegenwoordig steeds meer regenwater afgekoppeld van de riolering en geïnfiltreerd in de bodem. Echter, het grootste deel wordt nog via de riolering afgevoerd naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI). Hier wordt het water gezuiverd en geloosd op het oppervlaktewater. Bij extreme regenval kan het rioolstelsel overbelast raken en al dan niet via een bergbezinkbassin direct lozen op het oppervlaktewater. Het onverharde deel van stedelijk gebied is begroeid en er treedt evapotranspiratie op. Het neerslagoverschot infiltreert in de bodem en draineert naar het oppervlaktewater.

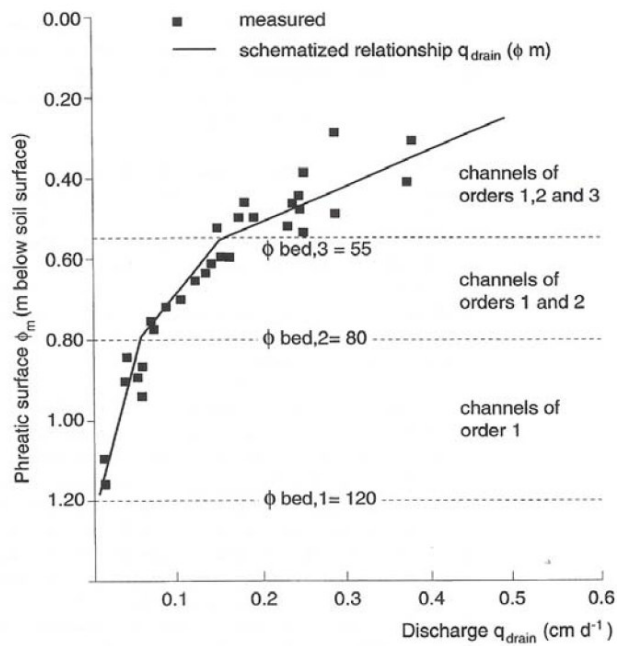
SWAP biedt geen optie om stedelijk gebied te modelleren. Derhalve moet een oplossing gezocht worden in het aanpassen van parameters. In de versie van FutureViewR die het uitgangspunt vormt voor deze studie is de volgende aanpak gevolgd: De Leaf Area Index (LAI) is op nul gezet waardoor er geen transpiratie wordt berekend. Dit is juist met betrekking tot het verharde deel van het stedelijk gebied. Echter, het onverharde begroeide deel zorgt wel degelijk voor transpiratie. Daarnaast infiltreert volgens de huidige schematisering het meeste water in de bodem, voedt het grondwater en komt via de drainagemiddelen vertraagd tot afstroming. Ook dit is niet waarheidsgetrouw.

De voor de hand liggende manier om stedelijk gebied met SWAP te modelleren is gebruik te maken van twee kolommen: één voor het verharde oppervlak en één voor het onverharde oppervlak. Voor de kolom "verhard oppervlak" kunnen de parameters dan zodanig aangepast worden dat de evapotranspiratie gelijk aan nul is en alle neerslag direct als oppervlakte-afvoer wordt afgevoerd. Er is dan nog geen onderscheid gemaakt in water dat via het riool wordt afgevoerd naar de RWZI en water dat bij extreme neerslag via een riooloverstort direct in het oppervlaktewater terecht komt. Voor de kolom "onverhard oppervlak" zou dan aangenomen kunnen worden dat het landgebruik grasland is. Voor het overige blijven de parameters ongewijzigd.

Vervolgens kan dan voor een rastercel met behulp van de verhouding verhard versus onverhard oppervlak de evapotranspiratie en runoff afgeleid worden. Met betrekking tot drainage is dit echter niet zo eenvoudig. Immers, de hoeveelheid water die in het geval van onverhard oppervlak infiltreert, zal het grondwater ook onder verhard oppervlak aanvullen. Als gevolg hiervan zullen grondwaterstanden in werkelijkheid minder stijgen dan gesimuleerd wordt. Nu is de relatie tussen grondwaterstand en drainage niet lineair maar verloopt kniksgewijs en is afhankelijk van de drainagebasis en de drainageweerstand van de drie onderscheiden typen drainagemiddelen (zie Figuur 12).

Vanwege dit drainage-effect is ervoor gekozen om stedelijk gebied in Quarles van Ufford met behulp van één SWAP-kolom te simuleren. Bijkomend voordeel is dat de bestaande structuur van het FutureViewR-instrumentarium met één SWAP-kolom per rastercel gehandhaafd kan blijven. Deze werkwijze vraagt wel om een nadere kalibratie van parameters opdat de hydrologie van stedelijk gebied zo goed mogelijk gesimuleerd wordt.





**Figuur 12: Drainage als functie van de gemiddelde grondwaterstand in het gebied Beltrum (Massop en de Wit 1994)**

### 2.2.2 Gevoeligheidsanalyse en kalibratie

De kalibratie wordt uitgevoerd aan de hand van één rastercel stedelijk gebied. Dit is geoorloofd daar de bodemfysische parameters, bij het ontbreken van een bodemkaart, in stedelijk gebied overal gelijk zijn verondersteld. Daar is aangenomen dat het stedelijk gebied goed ontwaterd is met behulp van buisdrainage zijn verschillen in slootdichtheid en oppervlaktewaterpeilen minder relevant. Aangenomen is dat het verhard oppervlak in stedelijk gebied overal 70% is. In werkelijkheid kan het percentage verhard oppervlak per rastercel verschillen. Echter, de gebruikelijke basisbestanden als top10-vlakken en LGN zijn niet geschikt om dit percentage te bepalen. Een analyse op basis van de Grootschalige Basis Kaart Nederland (GBKN) kan wel uitkomst bieden (Heijkers en Wendt, 2005). Dit is echter een tijdrovende klus en valt buiten de doelstelling van dit onderzoek.

De hier uitgevoerde kalibratie is niet gebaseerd op meetgegevens, maar op de methode om stedelijk gebied met twee SWAP-kolommen te simuleren, één voor verhard en één voor onverhard. Resultaten van deze dubbele simulatie is de oppervlakte-afvoer, interceptie-verdamping, bodemverdamping en gewasverdamping die optreedt bij een verhard oppervlak van 70%. Tabel 5 geeft deze inschatting op basis van twee SWAP-kolommen voor het jaar 2004. Met 840 mm neerslag is dit een gemiddeld jaar. Vervolgens wordt bepaald met welke parameterinstellingen voor één SWAP-kolom deze processen vergelijkbaar gesimuleerd worden.

In Tabel 5 is 100% verhard oppervlak gebaseerd op één SWAP-kolom: Alle neerslag wordt afgevoerd via het verharde oppervlak. Er vindt geen verdamping plaats. Modeltechnisch is dit geschematiseerd door de doorlatendheid van de bovengrond een minimale waarde ( $1.0 \cdot 10^{-5}$  cm/dag) te geven en de LAI en de bodemverdampingscoëfficiënt van Black gelijk aan nul te stellen.



Geen verhard oppervlak (0%) is gebaseerd op één SWAP-kolom: Er wordt uitgegaan van grasland. Parameters die hierbij horen zijn een LAI van 3, een gewasfactor voor het berekenen van de verdamping van 1,2, een bewortelingsdiepte van 30 cm en een standaard bodemverdampingscoëfficiënt van Black van 0,35 cm/dag. Uit Tabel 5 blijkt dat in dit geval het meeste water via verdamping uit het systeem verdwijnt en de oppervlakte-afvoer verwaarloosbaar is.

Kwantificering van de hydrologische processen bij 70% verhard oppervlak is afgeleid van een oppervlaktemiddeling van deze processen op basis van de afzonderlijke SWAP-kolommen voor verhard en onverhard oppervlak. Kalibratie moet leiden tot één SWAP-kolom met een vergelijkbaar resultaat voor 70% verhard oppervlak. Vergelijkbaar is vooraf gedefinieerd als: Elk hydrologisch proces uit Tabel 5 mag niet meer afwijken dan het resultaat van de oppervlaktemiddeling volgens een verhard oppervlak van 60% en 80%. Hiertoe zijn deze percentages verhard oppervlak eveneens weergegeven in Tabel 5.

**Tabel 5: Hydrologische processen voor stedelijk gebied (rastercel 141) in 2004, uitgangspunt is één SWAP-kolom voor verhard en één voor onverhard oppervlak en een oppervlakte-middeling.**

Percentage verhard oppervlak	100%	0%	70%	60%	80%
Oppervlakte-afvoer (mm)	839	0	<b>587</b>	503	671
Bodemverdamping (mm)	0	101	<b>30</b>	40	20
Interceptie (mm)	0	98	<b>29</b>	39	20
Gewasverdamping (mm)	0	460	<b>138</b>	184	92

Alvorens te bepalen met welke parameterinstellingen voor één SWAP-kolom deze processen vergelijkbaar gesimuleerd worden is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Hieruit bleken de volgende parameters het meest gevoelig voor de beschouwde processen:

- Doorlatendheid van de bovengrond ( $K_{sat}$ ):  
Bij een afname van  $K_{sat}$  neemt de oppervlakte-afvoer toe. Secundair effect is dat een verminderde bodeminfiltratie de vochtvoorziening van het gewas verslechtert en de gewasverdamping vermindert
- Leaf Area Index (LAI):  
Bij een toename van de LAI stijgt logischerwijs de interceptie en gewasverdamping en neemt de bodemverdamping af. Secundair effect is een afname van de oppervlakte-afvoer.
- Bodemverdampingscoëfficiënt van Black ( $\beta_1$ ):  
Bij een afname van  $\beta_1$  vermindert de actuele bodemverdamping. Hierdoor is er meer water beschikbaar voor oppervlakte-afvoer en gewasverdamping.

Met betrekking tot het beïnvloeden van de oppervlakte-afvoer is de doorlatendheid van de bovengrond de belangrijkste parameter. Daarnaast veroorzaakt het verminderen van de maaiveldberging een geringe toename in de oppervlakte-afvoer. De overige parameters die SWAP gebruikt bij het berekenen van de oppervlakte-afvoer (een weerstand en een coëfficiënt) blijken echter geheel ongevoelig.

Uiteindelijk in een iteratief proces de LAI,  $K_{sat}$  en  $\beta_1$  aangepast om zo goed mogelijk de waterbalans van stedelijk gebied volgens Tabel 5 te simuleren. Het resultaat is weergegeven in Tabel 6. In deze tabel zijn eveneens de resultaten van voor de kalibratie toegevoegd.

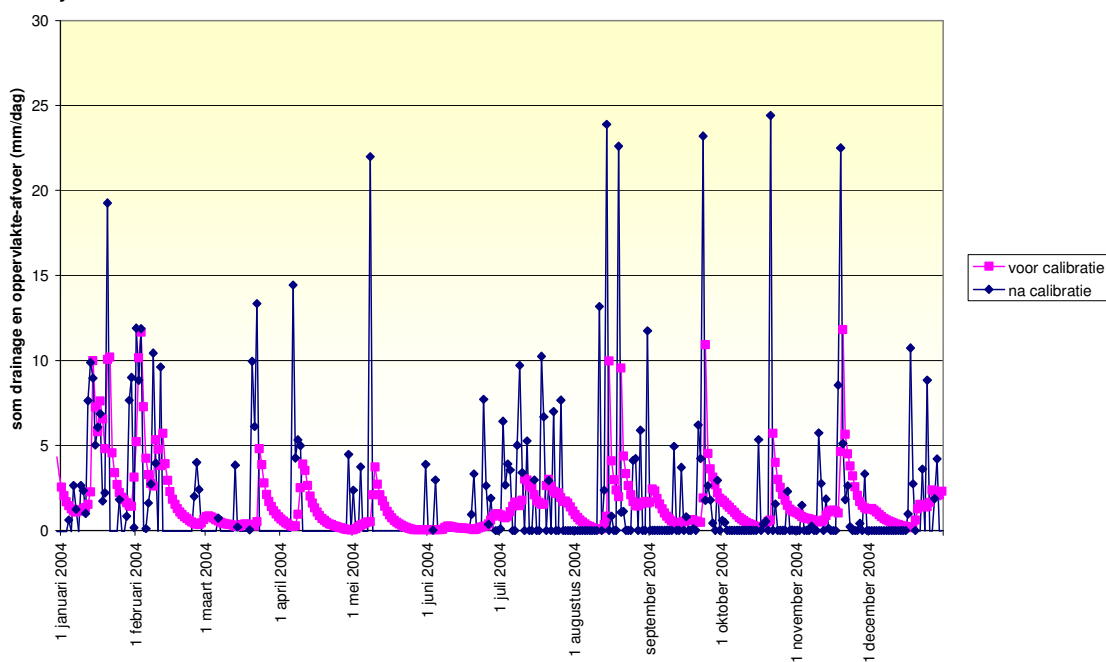


**Tabel 6: Parameterinstellingen voor kalibratie en na kalibratie van stedelijk gebied (plot 141) en kwantificering van de resulterende hydrologische processen in 2004. Uitgangspunt is 70% verhard oppervlak en één swap-kolom.**

Situatie	Voor Kalibratie	Na Kalibratie
<b>Invoer</b>		
Ksat (cm d <sup>-1</sup> )	2,36	0,0236
LAI (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0	0,9
$\beta_1$ (cm d <sup>-1/2</sup> )	0,35	0,035
<b>Uitvoer</b>		
Oppervlakte-afvoer (mm)	3	636
Bodemverdamping (mm)	264	39
Interceptie (mm)	0	29
Gewasverdamping (mm)	0	151

Vergelijking van Tabel 6 met Tabel 5 laat zien dat de kalibratie heeft geleid tot een veel realistischere simulatie van hydrologische processen in stedelijk gebied. De gesimuleerde oppervlakte-afvoer, de bodemverdamping, de interceptie en de gewasverdamping voldoen allemaal aan de vooraf gestelde eis. Dit geldt niet alleen voor het gemiddelde jaar 2004 maar tevens voor alle jaren in de periode 1993-2004. Enige uitzondering is dat in natte jaren de bodemverdamping enigszins overschat wordt. In het extreem natte jaar 1998 is deze overschatting echter nog maar 5 mm.

De grootste verbetering is dat na kalibratie de meeste neerslag snel het systeem verlaat via oppervlakte-afvoer. Voor kalibratie gebeurde dit nog vertraagd via de bodem. Figuur 13 laat dit duidelijk zien.



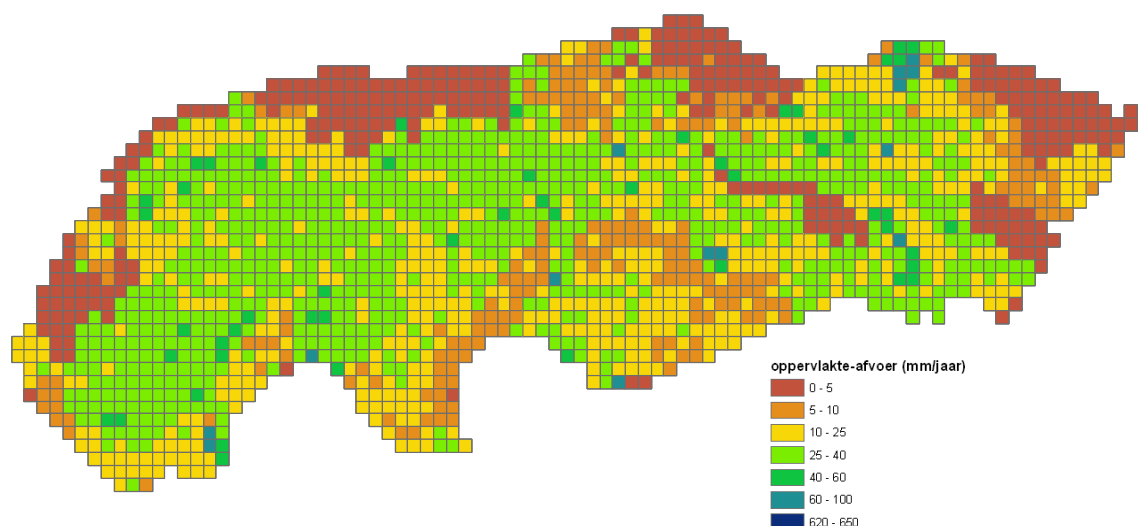
**Figuur 13: Som afvoer via het oppervlak en drainage via de bodem in 2004 voor stedelijk gebied (plot 141).**



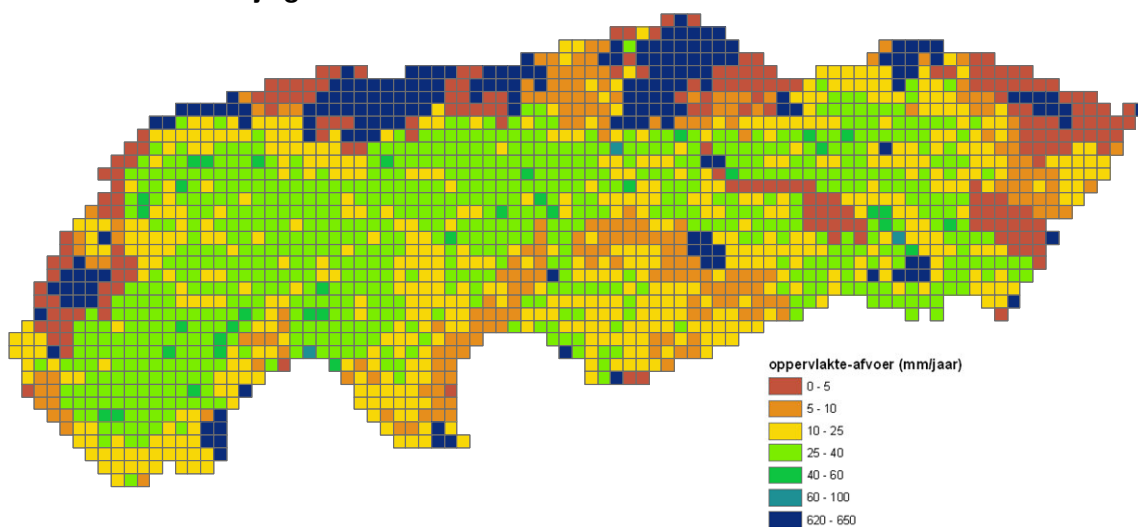


### 2.2.3 Implementatie

Tenslotte is de parameterisatie voor stedelijk gebied volgens Tabel 6 ingebouwd in FutureViewR. Figuur 14 toont de oorspronkelijk oppervlakte-afvoer voor 2004 voor het gehele modelgebied. Figuur 15 laat de situatie na kalibratie van stedelijk gebied zien. De verbetering is duidelijk: Waar de stedelijke kernen in Figuur 14 nog onzichtbaar zijn springen ze er in Figuur 15 duidelijk uit als de gebieden met meer dan 600 mm oppervlakte-afvoer per jaar.



**Figuur 14: Oppervlakte-afvoer voor het jaar 2004 gesimuleerd met FutureViewR voor kalibratie van stedelijk gebied.**



**Figuur 15: Oppervlakte-afvoer voor het jaar 2004 gesimuleerd met FutureViewR na kalibratie van stedelijk gebied.**

De oppervlaktewater-afvoer van stedelijk gebied verdwijnt voor het grootste gedeelte via de riolering naar de rioolwaterzuiveringsinstallaties. Alleen de RWZI's Dreumel en Maasbommel lozen in de polder. Er zijn slechts 10 stedelijke plots binnen de polder die lozen op deze RWZI's. Aanpassing van de oppervlaktewatermodule op dit punt vergt een grote inspanning en het effect zou nihil zijn. Daarom is hier voorsnog van afgezien. Wel zijn de riooloverstorten

opgenomen in de oppervlaktewatermodule van FutureViewR. Hierbij is aangenomen dat de dimensionering van de riolering 0,7 mm per uur bedraagt. Dit is op dagbasis 16,8 mm. Bij een berekende oppervlaktewater-afvoer van stedelijke plots die op dagbasis hoger is wordt verondersteld dat het riool overstort op het dichtstbijzijnde oppervlaktewater. Figuur 13 laat zien dat volgens FutureViewR in 2004 het riool zeven maal overstort. Waterschap Rivierenland heeft geen metingen met betrekking tot de overstortfrequentie. Wel zijn er indicatieve berekeningen uitgevoerd met rioleringsmodellen. In deze modellen is de capaciteit van het rioolstelsel niet overal gelijk en varieert de overstortfrequentie per locatie. Gemiddeld is de overstortfrequentie volgens deze rioleringsmodellen 9 maal per jaar. Qua orde van grootte lijkt de berekening van FutureViewR dus reëel. In paragraaf 2.5 worden de resultaten van de aangepaste oppervlaktewatermodule behandeld.

## 2.3 Kwel en wegzijging

In een eerdere studie (Immerzeel et al., 2007) is naar voren gekomen dat het model-instrumentarium de hoeveelheden kwel en wegzijging, met name ter hoogte van zandbanen, mogelijk onderschat. In deze paragraaf volgt eerst een samenvatting van de ontwikkeling van de kwelmodule van FutureViewR. Er is een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de zandbanen uitgevoerd. Deze wordt in §2.3.2 beschreven. De door FutureViewR berekende kwel- en wegzijgingshoeveelheden worden vergeleken met die van een recent uitgevoerde grondwatermodellering (ref.). Aan de hand van deze vergelijking worden de uiteindelijke parameters van de kwelmodule vastgesteld en doorgevoerd in FutureViewR.

### 2.3.1 Ontwikkeling van de kwelmodule

De kwelmodule die voor FutureView is ontwikkeld is uitgebreid beschreven in Van Heerwaarden et al. (2005). De kwel of wegzijging per rastercel is afhankelijk van de afstand tot de rivier en het verschil in rivierwaterstand en grondwaterstand zoals berekend door SWAP (zie Formule 1). De kwelfactor is in eerste instantie vastgesteld met behulp van een tweedimensionaal grondwatermodel uitgaande van een weerstand van de deklaag van 500 dagen en een KD-waarde van het onderliggende watervoerend pakket van 200 m<sup>2</sup>/dag. Deze kwelfactor komt overeen met de analytische oplossing volgens Mazure<sup>1</sup> voor dezelfde bodemparameters. Na afsluiten van de studie van Van Heerwaarden et al. (2005) is de kwelfactor gebruikt als kalibratie parameter om de waterbalans van de polder beter te benaderen<sup>2</sup>. Deze gekalibreerde kwelfactor staat genoemd in formule 1.

$$q = \text{kwelfactor}(x) * (WS_{\text{rivier}} - H) \quad (\text{Formule 1})$$

$$\text{kwelfactor}(x) = 0,00191 * e^{-0,0024x}$$

$Q$	Fluxdichtheid kwel of wegzijging	[m d <sup>-1</sup> ]
$WS_{\text{rivier}}$	Waterstand in de rivier	[m]
$H$	Stijghoogte	[m]
$X$	Afstand tot de rivier	[m]
$\text{kwelfactor}(x)$	Factor afhankelijk van weerstand van de deklaag (c), doorlatendheid van de aquifer (kD) en afstand tot de rivier (x)	[d <sup>-1</sup> ]

<sup>1</sup> Analytische oplossing van Mazure:  $\text{kwelfactor}(x) = c^{-1} * e^{-x/\sqrt{kDc}}$

<sup>2</sup> Deze wijziging is niet vermeld in de rapportage van Immerzeel et al, 2007



In de kwelmodule is opgenomen dat de kwel of wegzijging met een constante factor wordt vermenigvuldigd indien er sprake is van een zandbaan (Formule 2). Deze zogenoemde zandbaanconstante werd met het 2D-grondwatermodel vastgesteld op 10. Na afsluiten van de studie van Van Heerwaarden et al. (2005) is deze zandbaanfactor aangepast om de waterbalans van de polder beter te benaderen<sup>2</sup>. Hieronder is deze aangepaste zandbaanconstante opgenomen. Een rastercel is als zandbaan aangemerkt als de fractie zandbaan volgens de zandbanenkaart aangeleverd door Waterschap Rivierenland minstens 50% is.

$$q = \text{zandbaanconstante} * \text{kwelfactor}(x) * (WS_{\text{rivier}} - H) \quad (\text{Formule 2})$$

$$\text{kwelfactor}(x) = 0,00191 e^{-0,0024x}$$

$$\text{zandbaanconstante} = 5$$

### 2.3.2 Gevoeligheidsanalyse met betrekking tot zandbanen

In het kader van deze studie is een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot kwel en wegzijging ter hoogte van de zandbanen uitgevoerd. Hiertoe is de zandbaanconstante en het criterium met betrekking tot zandbaanrasters aangepast. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor het kwelrijke jaar 2002 en het kwelarme jaar 2004.

Aanpassing van de zandbaanconstante spreekt voor zich en sluit aan op de wijzigingen die in de voorgaande paragraaf zijn beschreven. Het criterium met betrekking tot zandbaanrasters is verruimd. Figuur 16a laat zien dat op basis van het oorspronkelijke criterium 326 rastercellen als zandbaan aangemerkt worden. Indien een raster reeds aangemerkt wordt als zandbaan bij een minimale overlap is met de zandbanenkaart (zie Figuur 16b) bedraagt het aantal zandbaanrasters 692.

**Tabel 7: Netto kwel<sup>3</sup> per jaar in 2002 en 2004 volgens FutureViewR afhankelijk van de zandbaanconstante en het aantal zandbaanrasters.**

Zandbaanconstante (-)	Zandbaanrasters	Netto Kwel 2002 (mm)	Netto Kwel 2004 (mm)
5	volgens Figuur 16a	157	32
10	volgens Figuur 16a	248	51
10	volgens Figuur 16b	379	82

Tabel 7 laat zien dat de kwel erg bepaald wordt door zowel de zandbaanconstante als het criterium voor zandbaanrasters. Met beide aanpassingen neemt de netto kwel zelfs met meer dan 100% toe. Overigens wordt in alle situaties de extra kwel afgevoerd als drainage. De extra kwel draagt niet bij aan een verhoogde gewasverdamping voor het jaar 2002.

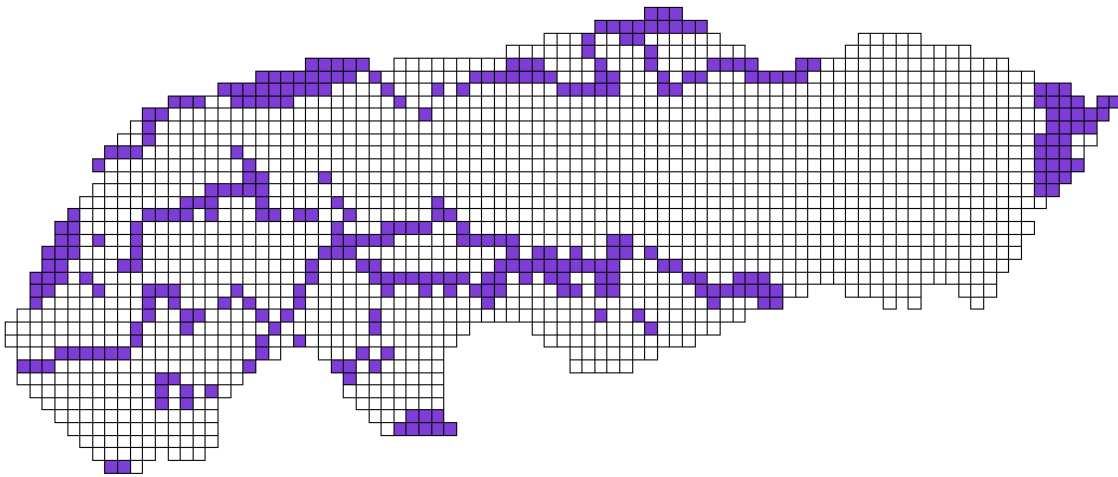
De geconstateerde gevoeligheid van de netto kwel in de polder voor de zandbaanconstante is reden geweest om opnieuw met het 2D grondwatermodel de invloed van zandbanen op kwel te onderzoeken. Deze analyse heeft uitgewezen dat de zandbaanconstante niet als constant kan worden verondersteld. Figuur 17 laat zien dat voor de genoemde bodemparameters de “zandbaanconstante” niet constant is maar afhankelijk is van de afstand tot de rivier. Een zandbaan op 25 m van de rivier verhoogt de kwel met een factor 20 terwijl een zandbaan op

<sup>3</sup> Netto kwel is kwel minus wegzijging.

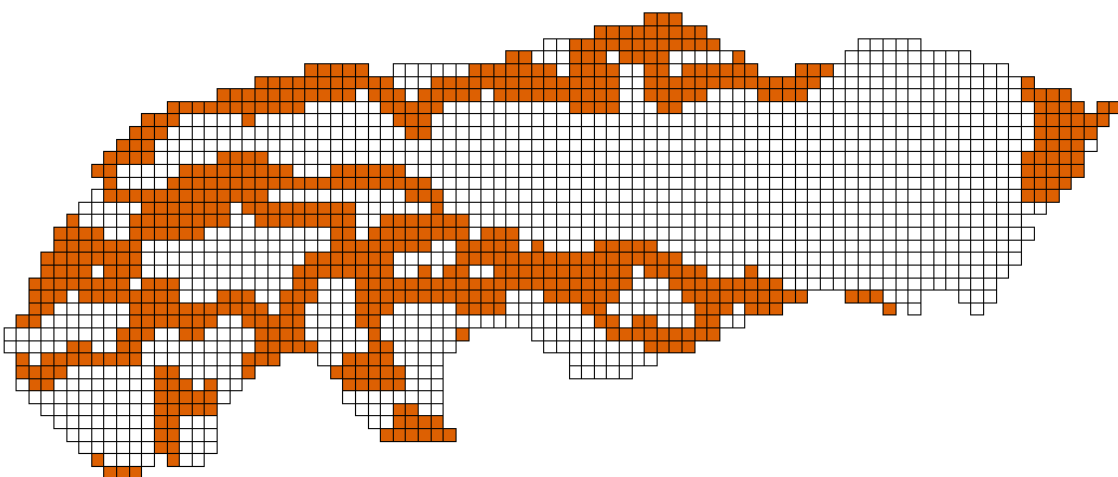


250 m van de rivier de kwel met een factor 5 verhoogt. De grote gevoeligheid van de hoeveelheid kwel dicht achter de dijk voor de aanwezigheid van zandbanen is te verklaren uit het feit dat het verlagen van de weerstand van de deklaag op twee manieren doorwerkt. In de eerste plaats zorgt een lagere weerstand voor meer totale kwel. In de tweede plaats is het nu eenvoudiger om water kwijt te raken door de deklaag. Er zal dus relatief meer water dicht achter de dijk opwellen en minder water verder weg. Feitelijk laat Figuur 17 zien dat de gebruikte analytische aanpak afwijkt van het 2D model. Ten eerste moet de zandbaanconstante afhankelijk zijn van de afstand tot de rivier. Ten tweede geeft de kwelfactor een afwijkende kwelwaarde berekend naast de zandbaan. Toch kan deze analytische benadering goed gebruikt worden om een inschatting te krijgen van de kwel en wegzijging als functie van de rivierstanden. In eerdere studies (Soppe et al, 2005) zijn kwel en wegzijging in het geheel niet gekwantificeerd. Voor een nauwkeurigere modellering van de kwel en wegzijging zou ook een ruimtelijk gedistribueerd grondwatermodel, waarin de zandbanen zijn opgenomen, gebruikt kunnen worden. Recentelijk is zo een model opgeleverd voor heel het beheersgebied van Waterschap Rivierenland. In de volgende paragraaf worden de uitkomsten van dit model vergeleken met de uitkomsten van FutureViewR.

a)

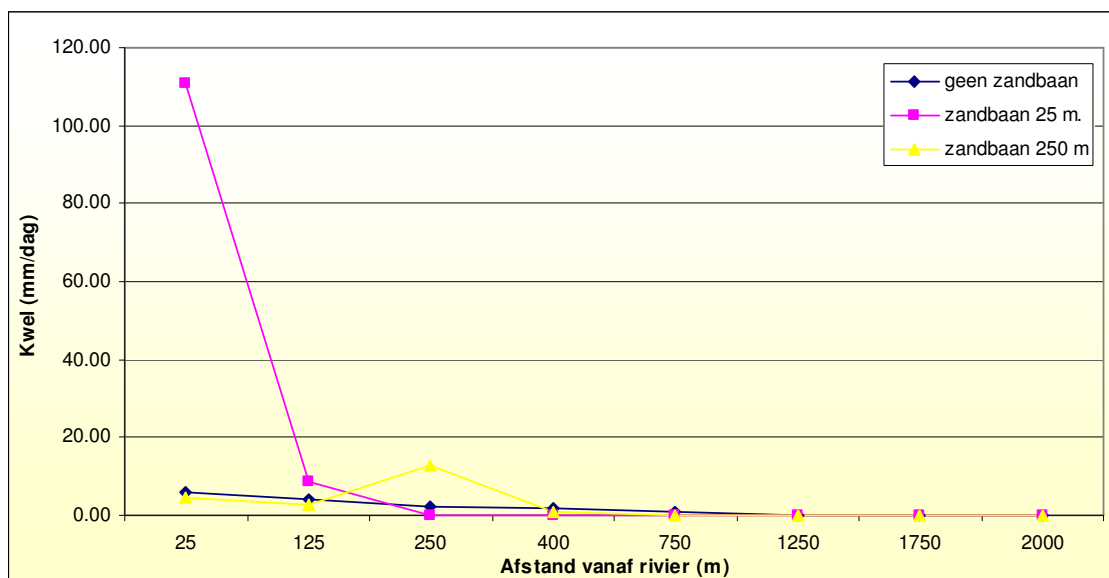


(b)



**Figuur 16: Implementatie van de zandbanen volgens het oorspronkelijke criterium van minimaal 50% bedekkingsgraad (a) en zandbanen volgens het ruimere criterium, een minimale bedekking (b).**





**Figuur 17: Kwel volgens het 2D-grondwatermodel met  $c=500$  dagen en  $KD=200 \text{ m}^2/\text{dag}$  en een verschil tussen de rivier waterstand en polderpeil van 4 m. Getoond wordt een situatie zonder zandbanen, een situatie met een zandbaan op een afstand van 25 van de rivier en een zandbaan op een afstand van 250 m van de rivier.**

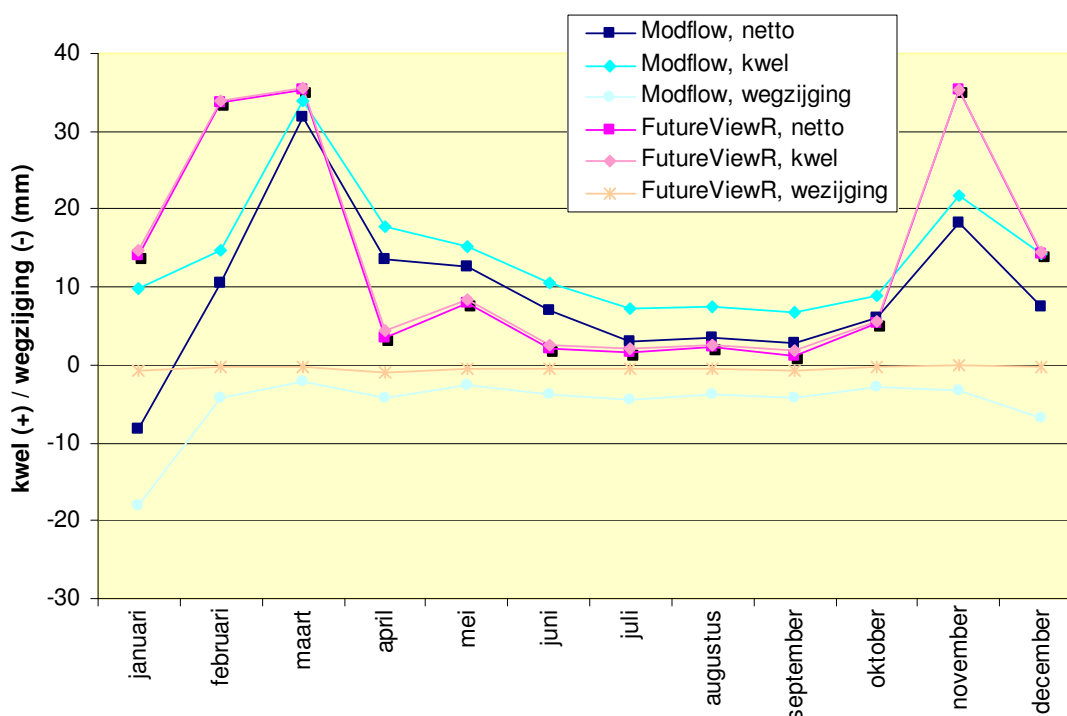
### 2.3.3 Vergelijking met uitkomsten grondwatermodel

Recentelijk is er een grondwatermodel opgeleverd voor het gehele beheersgebied van waterschap Rivierenland. Dit grondwatermodel maakt deel uit van een nieuw modelinstrumentarium opgezet in Imod. De naam van het instrumentarium is Moria wat staat voor Modelleren Rivierenland Interactief en Actueel (Linden van der, 2008). Ook de polder Quarles van Ufford is hierin opgenomen. Het betreft een niet-stationair grondwatermodel met een resolutie van 25 x 25 m. De ondergrond is geschematiseerde met 18 lagen en gebaseerd op REGIS2. De zandbanden zijn geschematiseerd. Rivierwaterstanden zijn opgenomen met een interval van 25 cm. Er wordt op dagbasis gerekend. Uitvoer is momenteel beschikbaar met een resolutie van 250x250 m voor de periode 1994-2004 per twee weken, op de 14<sup>e</sup> en de 28<sup>e</sup> van elke maand.

Gebaseerd op deze tweewekelijkse uitvoer is de gemiddelde netto kwel in 2002 en 2004 respectievelijk 109 mm en 26 mm. Volgens FutureViewR (Tabel 7) geeft de oorspronkelijke instellingen (een zandbaanconstante van 5 en de implementatie van zandbanen volgens Figuur 16a) de meest vergelijkbare situatie weer. Figuur 18 geeft een maandelijkse vergelijking van kwel en wegzijging over het jaar 2002. Het patroon van de netto kwel van FutureViewR is vergelijkbaar met dat van Modflow. In het zomerseizoen wordt met FutureViewR minder kwel berekend terwijl de hoeveelheid kwel in februari en november volgens FutureViewR juist hoger is. De wegzijging is volgens FutureViewR verwaarloosbaar. Volgens Modflow is de wegzijging het hele jaar door hoger. Opmerkelijk is dat in januari Modflow zelfs meer wegzijging dan kwel berekend.

In Figuur 20a en Figuur 20b wordt het ruimtelijk beeld van kwel en wegzijging voor FutureViewR vergeleken met het MODFLOW model voor een dag in de winter van 2002 met hoge rivierwaterstanden. In Figuur 21a en Figuur 21b wordt het ruimtelijk beeld van kwel en wegzijging voor FutureViewR vergeleken met het MODFLOW model voor een dag in de zomer van 2003

met lage rivierwaterstanden. In februari 2002 berekent FutureViewR een duidelijke gradiënt met veel kwel dichtbij de rivieren en geen kwel in het centrum van de polder. Daar de rivierwaterstanden hoger zijn dan de polderpeilen komt wegzijging niet voor. Kwel in de polder is volgens Modflow minder afhankelijk van de afstand tot de rivier. Er wordt minder kwel berekend, met name langs de Maas. In het oosten en centrale deel van de polder treedt ook wegzijging op. Een verklaring voor de verschillen is dat in Modflow wegzijging optreedt in de hogere gebieden in het oosten van de polder dat weer opkwelt in de lageregelegen delen in het westen van de polder. Dit effect is ook zichtbaar in Figuur 18. Ook de invloed van kwel vanuit de stuwwallen ten noorden van de polder wordt in Modflow meegenomen. In de kwelmodule van FutureViewR is alleen kwel vanuit de rivier opgenomen.



**Figuur 18: Netto kwel (positief) of wegzijging (negatief) per maand in 2002 volgens Modflow en volgens FutureViewR (zandbaanconstante=5, zandbaanrasters volgens Figuur 16a). Ook de afzonderlijke kwel- en wegzijgingstermen zijn opgenomen.**

In augustus 2003 treedt volgens FutureViewR in een smallere strook langs de Waal wegzijging op. Als gevolg van de stuw in de Maas treedt langs de Maas volgens beide modellen kwel op. In het centrale deel van de polder is volgens FutureViewR de netto kwel of wegzijging nihil. Modflow berekent in het centrale deel van de polder wegzijging voor de hogere delen en kwel voor de lagere delen. Opnieuw ligt de verklaring in het feit dat Modflow niet alleen de invloed van rivierwaterstanden maar ook het effect berekent van andere stijghoogtegradiënten, zowel binnen als buiten de polder.

#### 2.3.4 Modelaanpassing

In Bijlage I is de waterbalans volgens FutureViewR vergeleken met de waterbalans volgens metingen voor 2002. In de waterbalans op basis van metingen is de netto kwel of wegzijging gebaseerd op de restterm. Het resultaat geeft geen reëel beeld en is niet bruikbaar voor vergelijking met de resultaten van FutureViewR.



In dit hoofdstuk is naar voren gekomen dat met het voorkomen van zandbanen in de polder het concept van de kwelmodule van FutureViewR verbeterd kan worden. Anderzijds geeft FutureViewR gemiddeld over de polder een beeld van maandelijks netto kwel dat vergelijkbaar is met Modflow. Wel is duidelijk dat met FutureViewR alleen het effect van de rivier meeneemt. Interne wegzijging en kwel als gevolg van hoogteverschillen binnen de polder wordt niet berekend. In de toekomst zou mogelijk de onderrandvoorwaarde voor SWAP over genomen kunnen worden door het Modflow-model. Momenteel is de uitvoer van Modflow voor het huidige klimaat en de huidige rivierwaterstanden nog niet op dagbasis beschikbaar. Met betrekking tot klimaatscenario's zijn er met Modflow nog helemaal geen berekeningen uitgevoerd. Vooralsnog handhaven we voor deze studie de bestaande kwelmodule van FutureViewR. Daar het model gebruikt zal worden om klimaatscenario's door te rekenen worden wel enige elementaire wijzigingen doorgevoerd:

De kwelfactor wordt aangepast door uit te gaan van realistische kD en c-waarden:

In Van Heerwaarden et al (2005) is voor de doorlatendheid van de deklaag en de aquifer de gemiddelde waarde genomen van respectievelijk zavel/lichte klei (0,01 m/dag) en zand (5 m/dag). Deze aanname is anders dan wat in het Modflow model is toegepast: de gemiddelde doorlatendheid van de deklaag is gesteld op 0,007 m/dag. De gemiddelde doorlatendheid van de aquifer op ongeveer 30 m/dag. In het 2D-grondwatermodel zijn deze doorlatendheden aangepast. Een groter doorlaatvermogen van de aquifer zorgt ervoor dat kwel vanuit de rivier verder de polder binnendringt. Om dit te kunnen simuleren is het 2D-grondwatermodel uitgebreid van 2 km vanaf de winterdijk tot 7 km vanaf de winterdijk. Vervolgens is met dit aangepaste 2D-model de kwelfactor bepaald (Formule 3) en geïmplementeerd in FutureViewR.

$$q = \text{kwelfactor}(x) * (WS_{\text{rivier}} - H) \quad (\text{Formule 3})$$

$$\text{kwelfactor}(x) = 0,001346 * e^{-0,0012x}$$

$Q$	Fluxdichtheid kwel of wegzijging	[m d <sup>-1</sup> ]
$WS_{\text{rivier}}$	Waterstand in de rivier	[m]
$H$	Stijghoogte	[m]
$X$	Afstand tot de rivier	[m]
$\text{kwelfactor}(x)$	Factor afhankelijk van weerstand van de deklaag (c), doorlatendheid van de aquifer (kD) en afstand tot de rivier (x)	[d <sup>-1</sup> ]

De zandbaanconstante wordt afhankelijk van de diepte van de zandbaan:

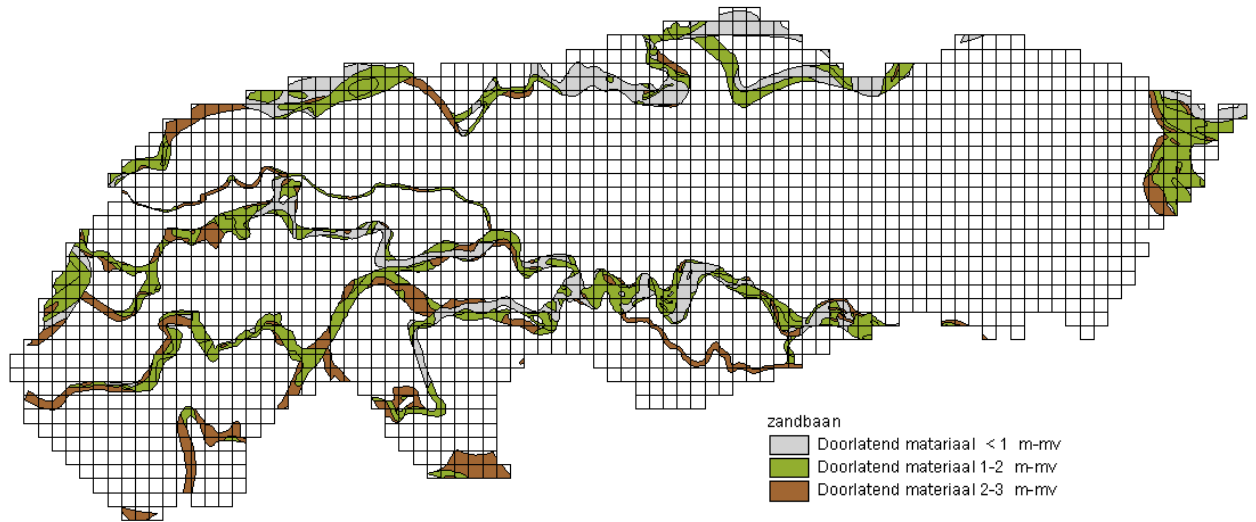
De zandbanenkaart aangeleverd door Waterschap Rivierenland geeft een indicatie van de diepte beneden maaiveld waarop de zandbaan aangetroffen wordt (zie Figuur 19). Een gevoeligheidsanalyse met het 2D-grondwatermodel wijst uit dat deze diepte veel invloed heeft op de kwelintensiteit. Tabel 8 geeft de relatie tussen de diepte van de zandbaan en de waarde van de zandbaanconstante. Deze zandbaanconstante is niet absoluut maar geeft een goede benadering. Met de aanpassing van doorlatendheden in combinatie met zandbanen waarboven zich nog een meer of minder dikke deklaag bevindt blijkt de zandbaanconstante nauwelijks afhankelijk van de afstand tot de rivier. Daarom is alleen de afhankelijkheid van de zandbaanconstante volgens Tabel 8 geïmplementeerd in FutureViewR. Hierbij is Figuur 16a aangehouden als criterium voor zandbaanrasters. Kwel of wegzijging voor een zandbaanraster wordt nu berekend volgens Formule 4.



$$q = \text{zandbaanconstante} * \text{kwelfactor}(x) * (WS_{\text{rivier}} - H) \quad (\text{Formule 4})$$

$$\text{kwelfactor}(x) = 0,00191 e^{-0,0024x}$$

zandbaanconstante afhankelijk van de diepte van de zandbaan volgens Tabel 8



**Figuur 19: De zandbanenkaart met een indicatie van de diepte van de zandbaan.**

**Tabel 8: Relatie tussen de diepte van de zandbaan en de zandbaanconstante**

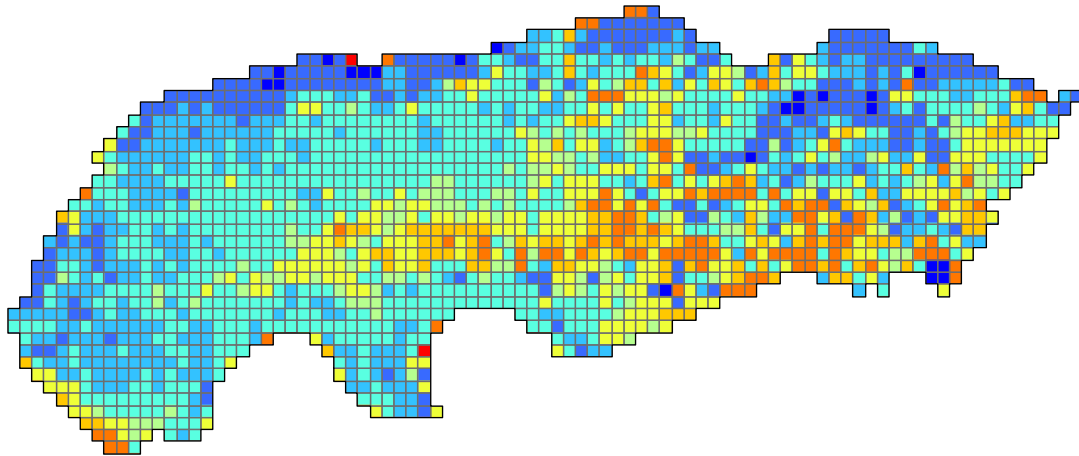
Diepte zandbaan (m – mv)	Zandbaanconstante
Doorlatend materiaal < 1 m - mv	5
Doorlatend materiaal 1-2 m - mv	3
Doorlatend materiaal 2-3 m - mv	2

Het resultaat van deze aanpassingen is dat in 2002 de netto kwel met ongeveer 25% toeneemt. Deze extra kwel vermindert de infiltratie, wordt gedraineerd en afgevoerd. In Hoofdstuk 3 wordt de maandelijkse waterbalans gepresenteerd. Figuur 20c en Figuur 21c tonen het ruimtelijk beeld van kwel en wegzijging voor 28 februari 2002 en 28 augustus 2003. Het is duidelijk dat met de aangepaste kwelfactor ook op grotere afstand van de rivier kwel en wegzijging berekend wordt. In een situatie met hoge rivierwaterstanden wordt ter hoogte van zandbanen midden in de polder nog een aanzienlijke kwel berekend (tot 4 mm per dag, zie Figuur 20c). Dit komt overeen met de ervaring van Waterschap Rivierenland.

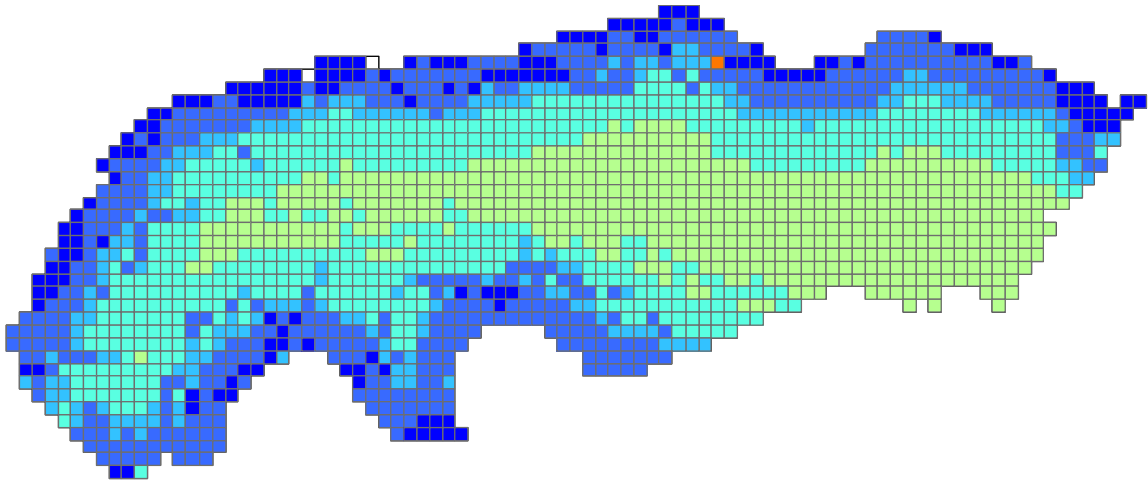




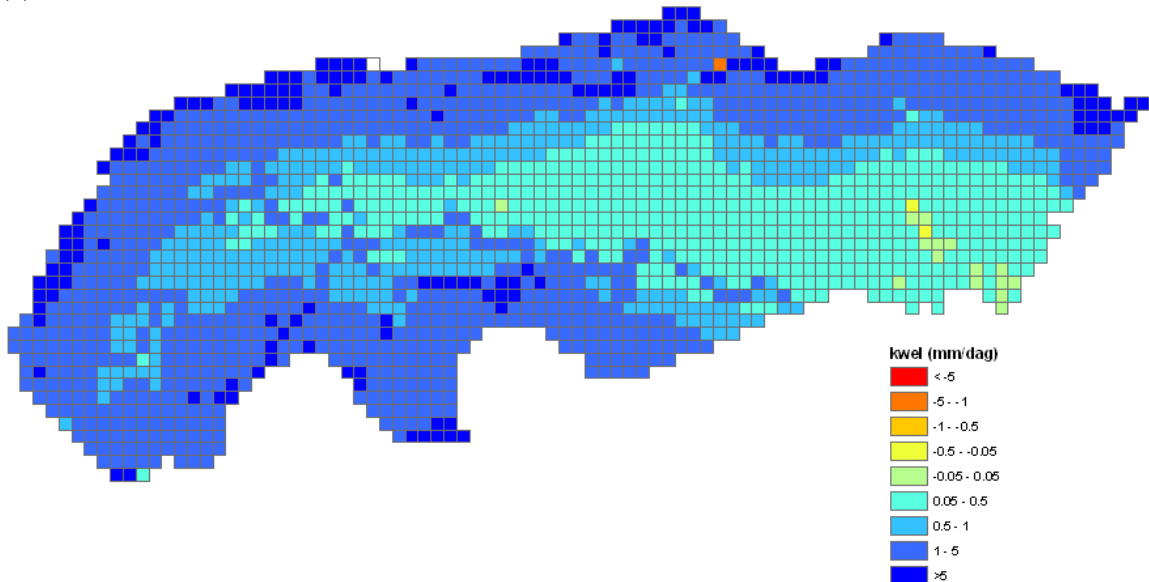
(a)



(b)

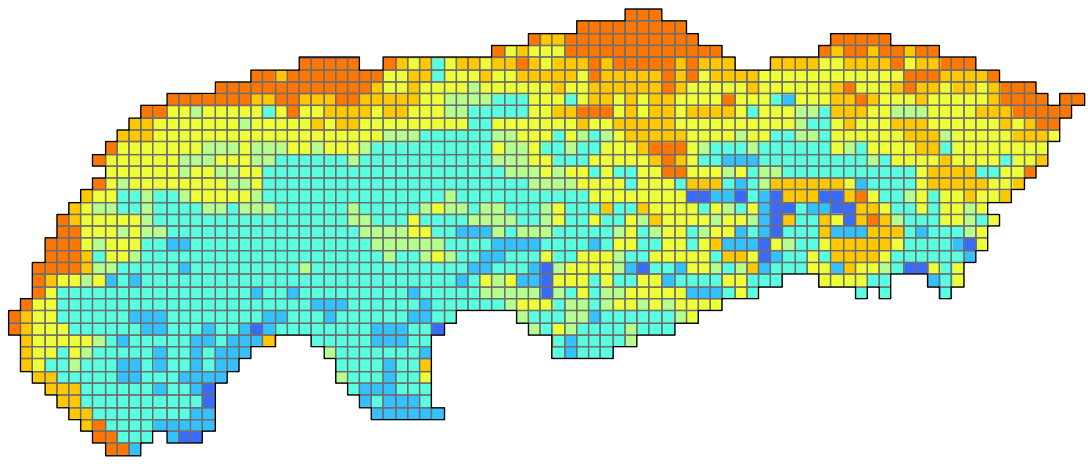


(c)

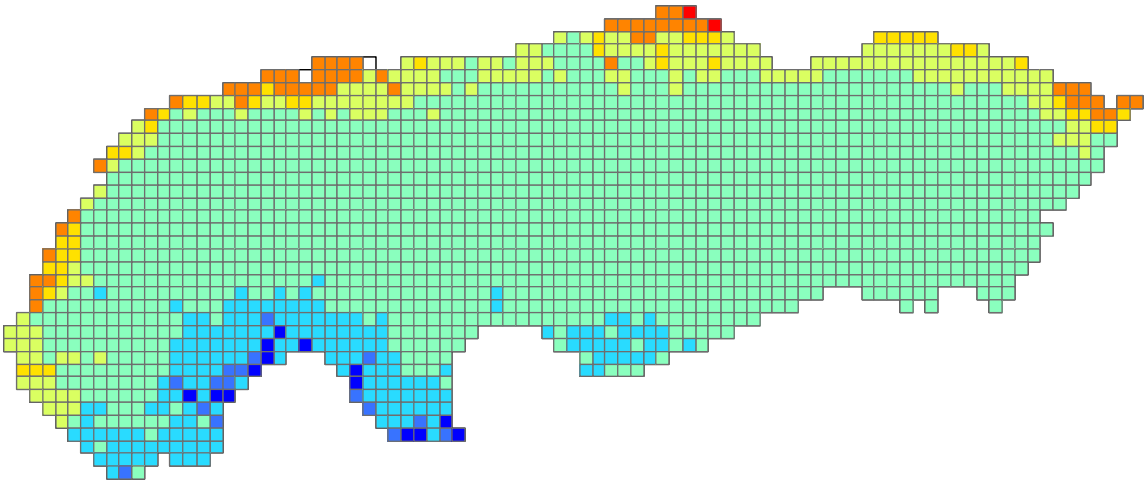


Figuur 20: Ruimtelijk beeld van kwel (positief) en wegzijging (negatief) op 28 februari 2002 volgens MODFLOW (a) en volgens FutureViewR voor modelaanpassing (b) en na modelaanpassing (c).

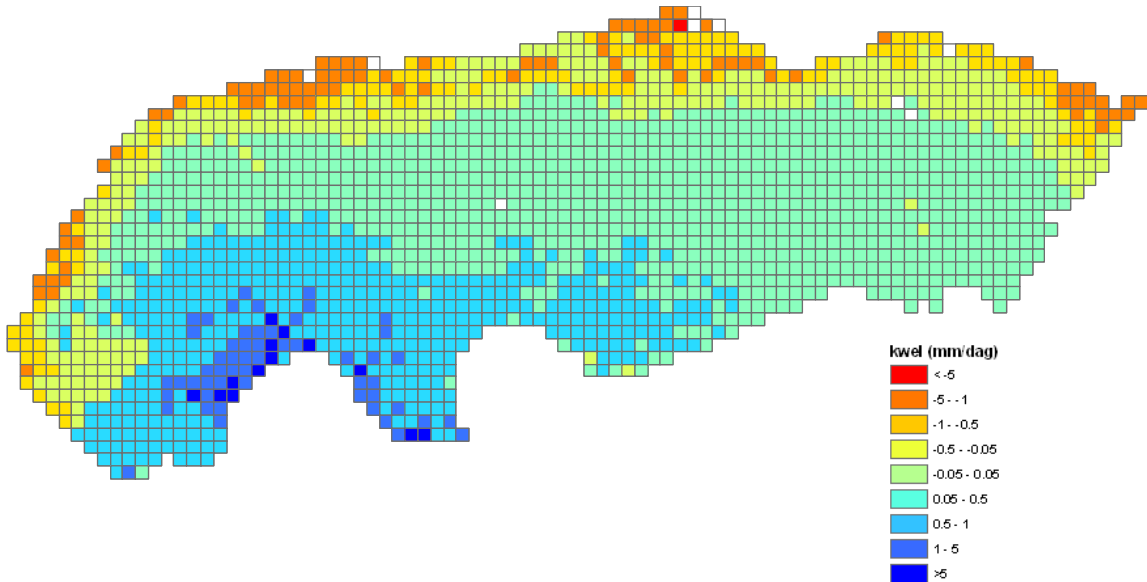




(b)



(c)



**Figuur 21: Ruimtelijk beeld van kwel en wegzijing op 28 augustus 2003 volgens MODFLOW (a) en volgens FutureViewR voor modelaanpassing (b) en na modelaanpassing (c).**

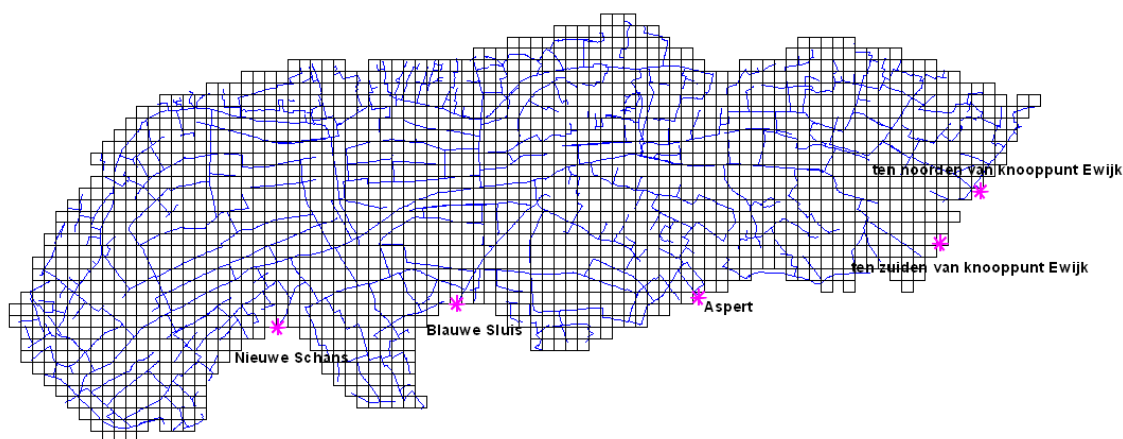


## 2.4 Wateraanvoer, Infiltratie en Drainage

### 2.4.1 Analyse

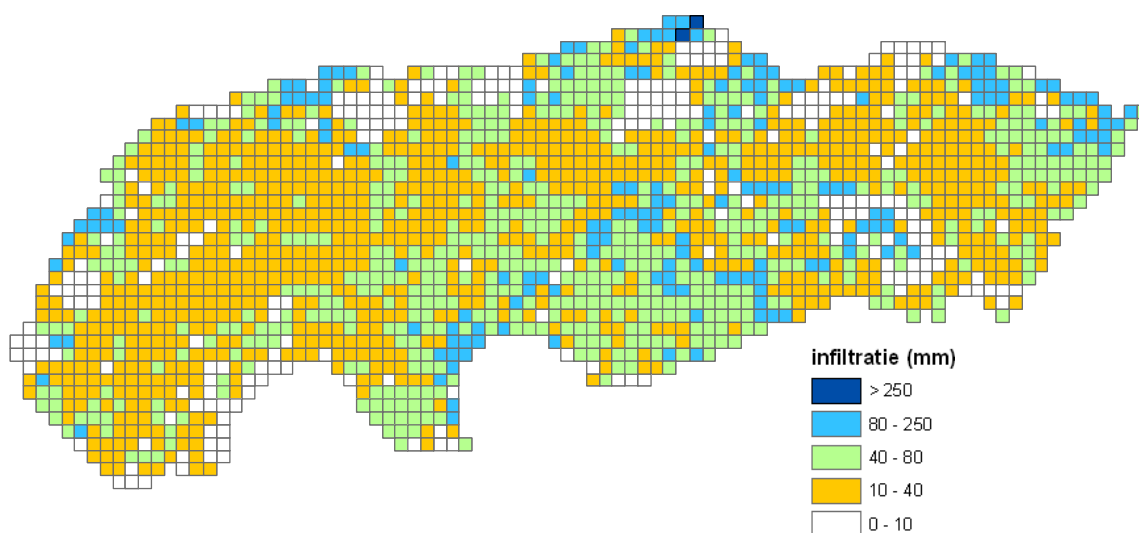
In een eerder onderzoek (Immerzeel et al., 2007) is de hoeveelheid water die volgens de oppervlakte water module van FutureViewR de polder verlaat vergeleken met een gemeten reeks bij het hoofdgemaal van de polder. Dit is gedaan voor het jaar 2002. Hierbij kwam naar voren dat vanaf het vroege voorjaar de gemeten afvoer structureel hoger was dan de gesimuleerde afvoer. In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre het opnemen van waterinlaat tot een verbetering van de simulatie van de waterafvoer kan leiden.

Vanuit de Maas kan onder vrij verval wateraanvoer plaatsvinden bij de inlaatpunten Blauwe Sluis en Nieuwe Schans. Tevens treedt er een voeding op vanuit het aangrenzende bemalingsgebied Bloemers, via opjager Aspert en twee duikers onder de A50. Deze inlaatpunten zijn weergegeven in Figuur 22. Sinds 2002 registreert waterschap Rivierenland de ingelaten hoeveelheden water.



**Figuur 22: Inlaatpunten polder Quarles van Ufford**

Eerst wordt uiteengezet hoe FutureViewR ook zonder oppervlaktwatermodule inzicht kan geven in de hoeveelheid water die wordt ingelaten ten behoeve van peilhandhaving. Uitgangspunt van het model is dat zomer- en winterpeilen gehandhaafd blijven. Drainage vanuit een rastercel naar het oppervlaktewater vindt plaats wanneer de grondwaterstand hoger is als het polderpeil. Infiltratie vanuit het oppervlaktewater naar een rastercel vindt plaats wanneer de grondwaterstand lager is dan het polderpeil. Sommatie van de infiltratiehoeveelheden over een bepaalde periode geeft een inschatting van de hoeveelheid water dat ingelaten wordt ten behoeve van peilhandhaving. In het droge jaar 2003 infiltreerde in de periode van 1 april t/m 30 september volgens FutureViewR 41 mm water gemiddeld over de gehele polder. Ter vergelijking: in de natere jaren 2002 en 2004 was dit respectievelijk 25 en 30 mm (zie ook Tabel 9). Figuur 23 toont de ruimtelijke verdeling van dit geïnfiltreerde water voor de genoemde periode in 2003. Volgens de ervaringen van Waterschap Rivierenland is de infiltratie in werkelijkheid hoger.



**Figuur 23: Ruimtelijke verdeling van de infiltratie in de periode van 1 april t/m 30 september 2003 volgens FutureViewR.**

Tabel 9 laat zien dat waterschap Rivierenland meer dan 100 mm meer water inlaat dan dat er volgens FutureViewR infiltreert. Eén proces dat niet is meegenomen in FutureViewR is beregening. Het verschil tussen de berekende infiltratie en de gemeten inlaat kan echter niet alleen verklaard worden door het niet meenemen van beregening. Dit leidt tot de conclusie dat een gedeelte van het ingelaten water bij het gemaal Quarles van Ufford de polder weer verlaat.

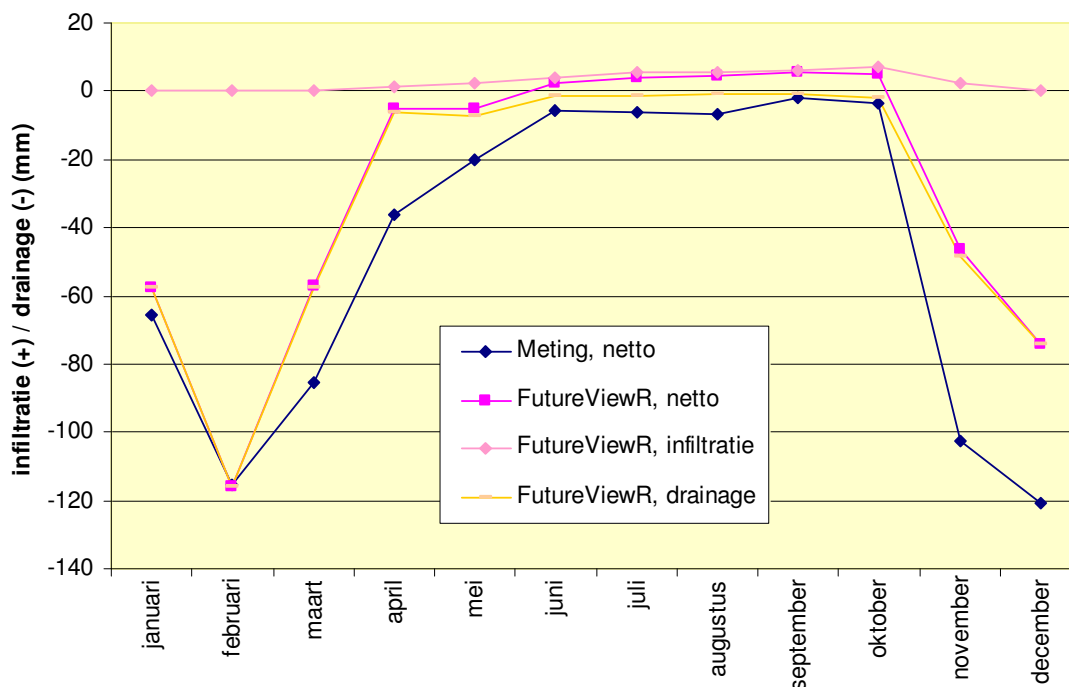
**Tabel 9: Infiltratie volgens FutureViewR en gemeten waterinlaat in de periode van 1 april t/m 30 september van respectievelijk 2002, 2003 en 2004.**

Periode	Infiltratie (mm)	ingelaten water (mm)
1 april t/m 30 september 2002	25	131
1 april t/m 30 september 2003	41	?
1 april t/m 30 september 2004	30	170

#### 2.4.2 Modelaanpassing

Naar aanleiding van bovenstaande analyse is de waterinlaat opgenomen in de oppervlakte-watermodule (zie ook paragraaf 2.5). In Bijlage I is de waterbalans volgens FutureViewR vergeleken met de waterbalans volgens metingen voor 2002. Figuur 24 geeft deze vergelijking op maandbasis weer met betrekking tot infiltratie en drainage. De netto drainage op basis van FutureViewR is lager dan die op basis van metingen. In de zomermaanden berekent FutureViewR meer infiltratie dan drainage. De waterbalans op basis van metingen wijst uit dat het gehele jaar door netto drainage plaatsvindt.





**Figuur 24: Netto infiltratie (positief) of drainage (negatief) in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. Voor FutureViewR zijn tevens de afzonderlijke infiltratie- en drainagermen opgenomen.**

Op basis van Figuur 24 en de ervaring van waterschap Rivierenland dat in de zomer meer water infiltreert dan aangegeven in Tabel 9 is de drainage- en infiltratieweerstand aangepast in FutureViewR. SWAP berekent drainage of infiltratie gebruik makend van de totale drainage- weerstand (Formule 5) of infiltratieweerstand (Formule 6).

$$\gamma_{\text{drain}} = \gamma_{\text{drain, inp}} + \frac{L}{U} \cdot \gamma_{\text{entry}} \quad (\text{Formule 5})$$

$$\gamma_{\text{inf}} = \gamma_{\text{inf, inp}} + \frac{L}{U} \cdot \gamma_{\text{exit}} \quad (\text{Formule 6})$$

$\gamma_{\text{drain}}$	Totale drainageweerstand	[d]
$\gamma_{\text{inf}}$	Totale infiltratieweerstand	[d]
$\gamma_{\text{drain, inp}}$	Drainageweerstand	[d]
$\gamma_{\text{inf, inp}}$	Infiltratieweerstand	[d]
$L$	Afstand tussen drainagemiddelen	[m]
$U$	Natte omtrek	[m]
$\gamma_{\text{entry}}$	Intree weerstand	[d]
$\gamma_{\text{exit}}$	Uittree weerstand	[d]

De oorspronkelijke infiltratie- en drainageweerstanden overgenomen uit STONE (Massop et al, 2000) zijn met een factor 2 verlaagd. De in- en uittreeweerstanden zijn met 1 dag reeds ingesteld op de minimale waarde. Een tweede aanpassing in het model is dat de slootpeilen niet meer worden geïnterpoleerd tussen het zomer- en winterpeil, maar dat ervan wordt uitgegaan dat de overgang va zomer naar winterpeil (en omgekeerd) op één dag plaats vindt (1 april en 1 oktober).

Het resultaat van deze aanpassingen is dat in de zomer van 2002 de infiltratie toeneemt van 25 mm naar 55 mm. De drainage in 2002 neemt toe van 374 mm naar 395 mm. Tabel 10 geeft

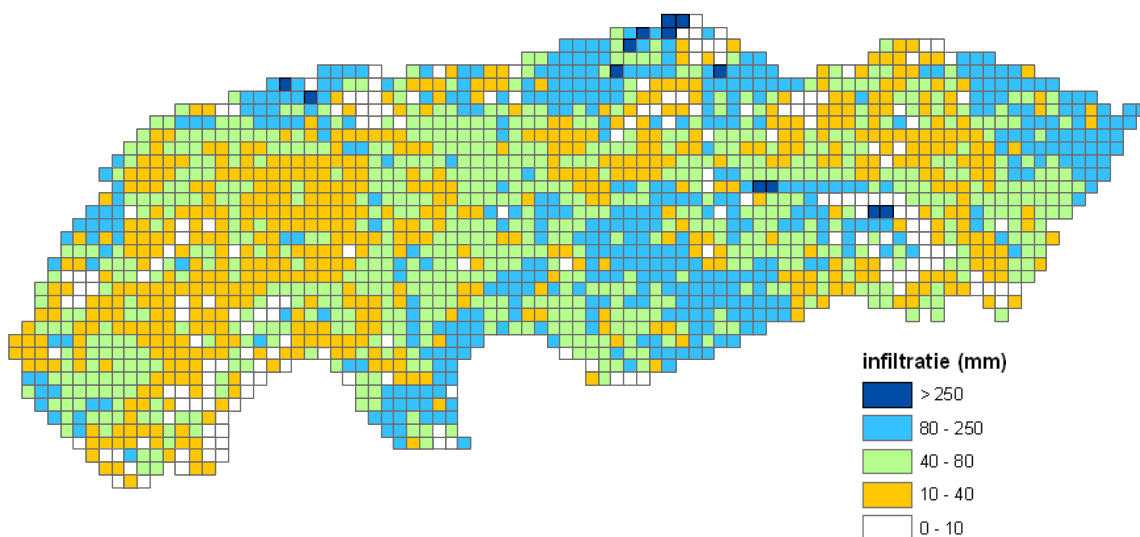


inzicht in het effect van elke aanpassing afzonderlijk. Overigens wordt door de in voorgaande paragrafen beschreven aanpassing van verdamping en kwel de infiltratie weer lager en de drainage juist nog hoger. Voor het juiste beeld wordt ook het effect van deze afzonderlijke aanpassingen weergegeven in Tabel 10. In hoofdstuk 3 wordt de volledige maandelijkse waterbalans gepresenteerd. Figuur 25 geeft de ruimtelijke verdeling van infiltratie voor de zomerperiode van 2003 na de aanpassingen in FutureView. In deze periode is de infiltratie gemiddeld over de polder toegenomen van 41 mm naar 68 mm. Vergelijking van dit figuur met Figuur 23 laat zien dat de extra infiltratie gelijkmatig over de polder verdeeld wordt.

Er is bekend waar berekening plaatsvindt binnen de polder en of berekend wordt uit oppervlaktewater of uit grondwater (zie Figuur 26). Beregeningshoeveelheden worden niet geregistreerd. Vooralsnog is berekening niet opgenomen in FutureViewR.

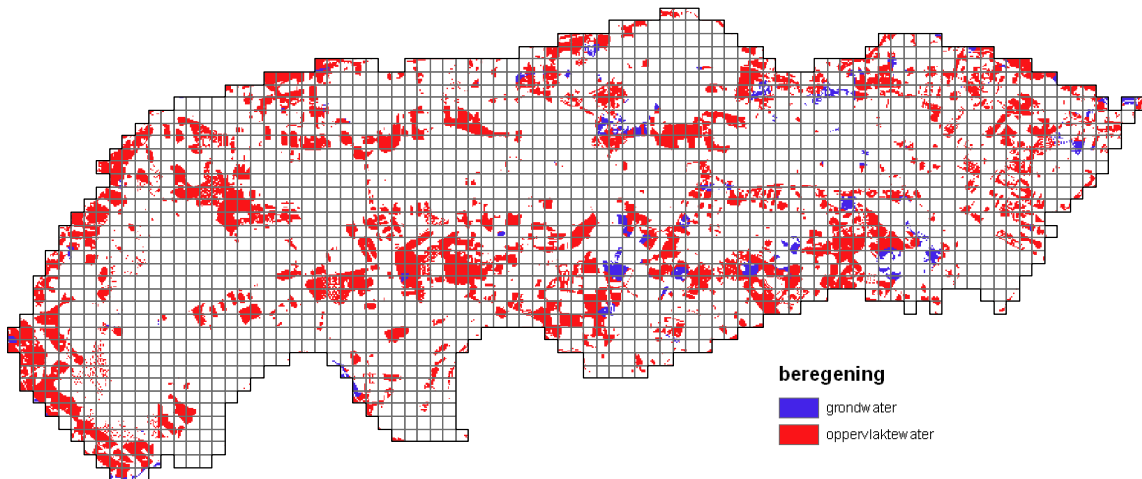
**Tabel 10: Effect van aanpassing van drainage- en infiltratie berekening op infiltratie en drainage in 2002. Tevens is weergegeven wat het effect is van aanpassingen in verdamping (§2.1.3) en kwel en wegzijging (§2.3.4) op infiltratie en drainage in 2002.**

	Infiltratie Zomer 2002 (mm)	Drainage 2002 (mm)
<b>Uitgangssituatie</b>	25	374
<b>Drainageweerstand / 2</b>	38	389
<b>Correctie zp/wp</b>	55	395
<b>Aanpassing verdamping (§2.1.3)</b>	36	455
<b>Aanpassing kwel (§2.3.4)</b>	31	494



**Figuur 25: Ruimtelijke verdeling van de infiltratie in de periode van 1 april t/m 30 september 2003 volgens FutureViewR na aanpassingen.**





**Figuur 26: Berekening in polder Quarles van Ufford (niet geïmplementeerd in FutureViewR).**

## 2.5 Oppervlaktewater

In de bovenstaande paragrafen zijn de aanpassingen met betrekking tot het SWAP gedeelte van FutureViewR beschreven. De ruimtelijke effecten van deze aanpassingen op de verschillende processen van de waterbalans zijn gepresenteerd. In deze paragraaf wordt de implementatie van aanpassingen aan de oppervlaktewatermodule van FutureViewR beschreven (§2.5.1) en worden de resultaten gepresenteerd (§2.5.2). Tevens wordt aandacht besteed aan de waterbalans van het oppervlaktewater (§2.5.3).

### 2.5.1 Aanpassing oppervlaktewatermodule

In Immerzeel et al., 2007 is de voor FutureViewR ontwikkelde oppervlaktewatermodule beschreven. In de huidige studie wordt deze module op de volgende punten aangepast:

#### Aangepaste balanstermen:

In de oppervlaktewatermodule was sprake van dubbeltellingen: De drainage en infiltratie van een plot werd in zijn geheel opgenomen als term naar/van het oppervlaktewater. Bovendien werd nogmaals alleen voor het openwater oppervlak afzonderlijk de termen kwel, wegzijging, neerslag en verdamping opgenomen. Daarnaast kwam de term oppervlakte-afvoer niet voor in de openwater module. Dit is aangepast.

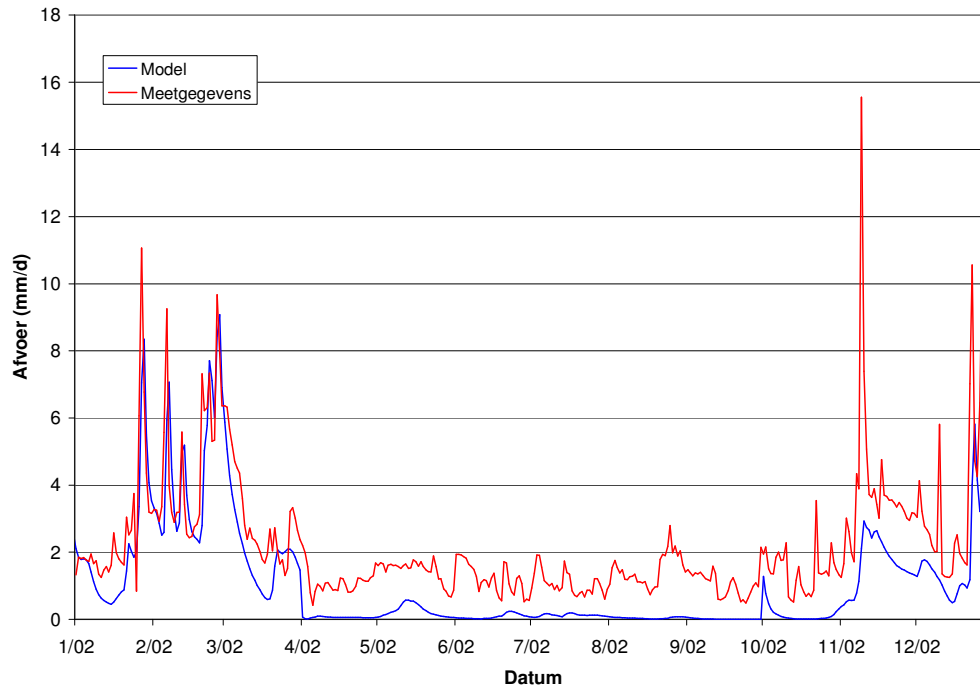
#### Rioolwateroverstort

Zoals in §2.2.3 aangekondigd, wordt voor stedelijke plots een oppervlakte-afvoer van meer van 16,8 mm/dag (de riolcapaciteit op dagbasis) opgenomen in de oppervlaktewatermodule. Aangenomen wordt dat deze rioloverstort plaatsvindt op het dichtstbijzijnde oppervlaktewater. Wanneer de oppervlakte-afvoer voor stedelijke plots lager is dan 16,8 mm/dag, wordt het niet opgenomen in de oppervlaktewatermodule. Het verdwijnt via de RWZI uit het modelgebied.

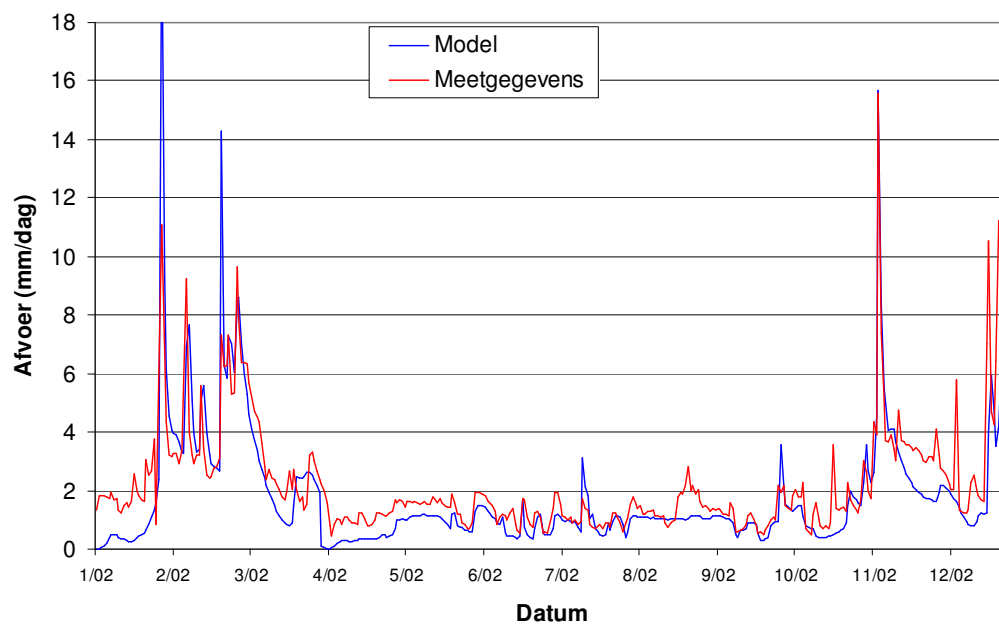
## Waterinlaat

Zoals in §2.4.2 aangekondigd, wordt waterinlaat opgenomen in de oppervlaktewatermodule. Op de vijf inlaatlocaties wordt op dagbasis de door Waterschap Rivierenland gemeten hoeveelheid water als randvoorwaarde opgelegd aan het model.

### 2.5.2 Resultaat oppervlaktewatermodule



**Figuur 27: Vergelijking van gemeten en gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder voor aanpassing van FutureViewR.**



**Figuur 28: Vergelijking van gemeten en gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder na aanpassing van FutureViewR.**



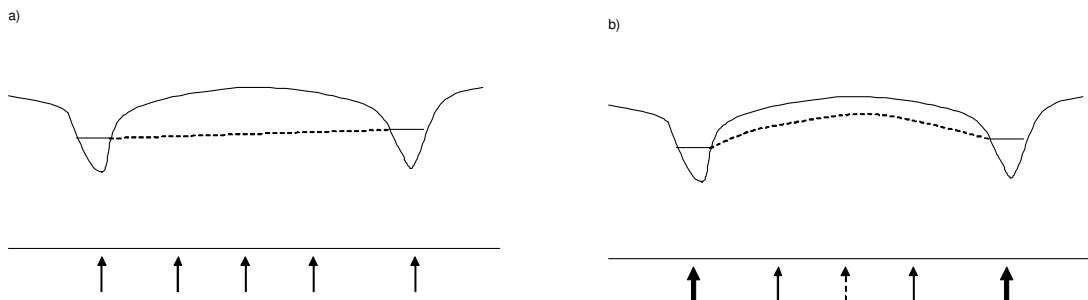


Figuur 27 en Figuur 28 geven respectievelijk een vergelijking van de gemeten en de gesimuleerde afvoer voor en na aanpassing van de oppervlaktemodule van FutureViewR. De simulatie van de afvoer is veel beter geworden. Zowel de lage afvoeren in de zomer als de piekafvoeren worden beter gesimuleerd. De afvoerpiek in januari (22 mm/dag) en eind december (26 mm/dag) wordt door FutureViewR wel overschat. De lage gesimuleerde afvoer begin januari zoals weergegeven in Figuur 28 is te wijten aan een foute beginconditie.

### 2.5.3 Waterbalans open water

Met name vanuit waterkwaliteitsoogpunt wil waterschap Rivierenland meer inzicht in de waterbalans van het oppervlaktewater. Voor de polder Quarles van Ufford kan met het verbeterde FutureViewR deze waterbalans opgesteld worden. De interesse van het waterschap betreft vooral het aandeel kwel in de waterbalans van het oppervlaktewater. Deze paragraaf gaat hier nader op in. Met name op de mogelijkheden en de onmogelijkheden die verbonden zijn aan het concept van SWAP.

Voordat we overgaan op modelconcepten beschouwen we schematisch de situatie voor een perceel binnen de polder Quarles van Ufford dat onder invloed staat van kwel vanuit de Maas of de Waal. Figuur 29 geeft een schematische weergave van de kwelintensiteit over de dwarsdoorsnede van het perceel en twee sloten. In een neutrale situatie zonder drainage of kwel is de kwelintensiteit ter hoogte van de sloten even groot als midden in het perceel. Immers, de grondwaterstand is overal gelijk. In een drainerende situatie is de kwelintensiteit ter hoogte van de sloten groter. In het midden van het perceel waar grondwaterstanden het hoogste zijn is de kwelintensiteit het laagst.

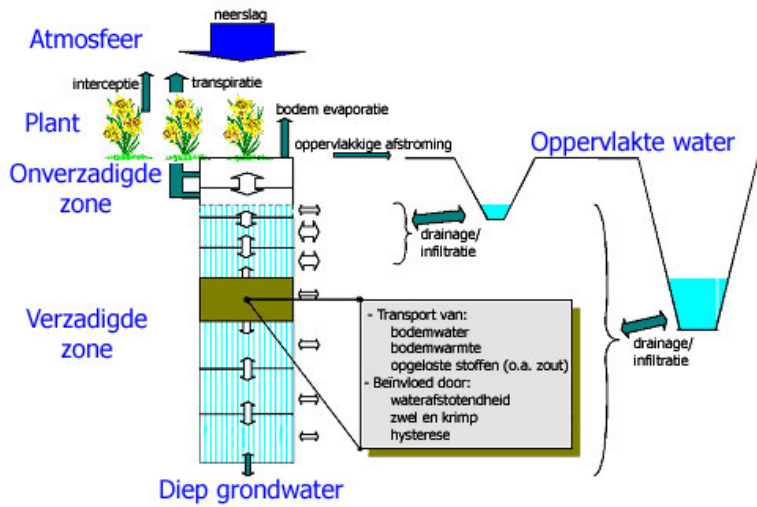


**Figuur 29: schematische weergave van de kwelintensiteit over een dwarsdoorsnede met twee sloten voor een situatie zonder drainage of infiltratie (a) en voor een drainerende situatie (b).**

In een ruimtelijk gedistribueerd hydrologisch model kan de kwelintensiteit zo goed mogelijk berekend worden door uit te gaan van kleine ruimtelijke eenheden, met name ter hoogte van hoofdwaterlopen. Voorwaarde is wel dat er horizontale uitwisseling van het grondwater plaats kan vinden tussen de ruimtelijke eenheden. FutureViewR bestaat uit 1-dimensionale SWAP-modellen zonder horizontale uitwisseling. Dit beperkt de mogelijkheden om verder ruimtelijk naar te schalen.

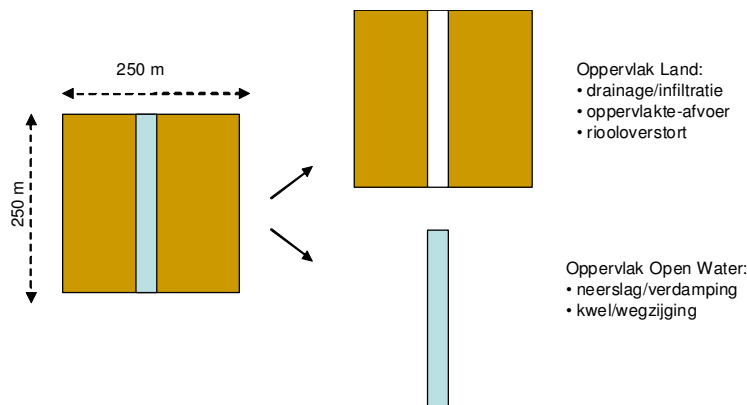
De ruimtelijke schematisatie van FutureViewR is een rastercel van 250x250 m. Per rastercel wordt met SWAP op dagbasis de uitwisseling van een 1-dimensionale grond/gewas kolom met

de atmosfeer (evapotranspiratie), het oppervlaktewater (drainage en infiltratie en oppervlakte-afvoer) en de ondergrond (kwel en wegzijging) berekend. Neerslag is als bovenrandvoorwaarde opgelegd. Kwel en wegzijging wordt met behulp van de kwelmodule berekend op basis van de rivierwaterstand en grondwaterstand. Kwel bereikt het oppervlaktewater via drainage. Figuur 30 geeft een schematische weergave van het SWAP-model.



**Figuur 30: Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 2008)**

Met het oog op een naar herkomst herleidbare waterbalans van het open water kan gesteld worden dat in ieder geval het water dat onder een sloot opkwelt in de sloot terecht komt. Vervolgens wordt neerslag, verdamping, kwel en wegzijging naar het oppervlaktewater berekend met behulp van het percentage open water per rastercel. Drainage, infiltratie en oppervlakte-afvoer naar of van het oppervlaktewater wordt bepaald aan de hand van het areaal land per rastercel. Figuur 31 geeft een schematische weergave. Op deze wijze is de waterbalans voor het open water opgesteld. In het volgende hoofdstuk wordt deze open water balans gepresenteerd voor het jaar 2002 en vergeleken met meetgegevens.



**Figuur 31: Berekening van de open water balans, schematische weergave.**



## 3 FutureViewR versus meetgegevens

In dit hoofdstuk wordt de waterbalans volgens het aangepaste FutureViewR-model vergeleken met de waterbalans volgens metingen. Behalve een gebiedsbalans is met het aangepaste FutureViewR nu ook mogelijk een balans voor het open water te maken. De belangrijkste aanpassingen zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk waren:

- verdamping
- stedelijk gebied
- kwel en wegzijging
- inlaat
- infiltratie en drainage

### 3.1 Waterbalans op jaarbasis

Tabel 11 geeft de waterbalans voor 2002 voor de polder Quarles van Ufford op basis van het verbeterde FutureViewR. Tabel 12 geeft dezelfde balans op basis van metingen. De restterm van de waterbalans op basis van FutureViewR representeert een verandering in waterberging in de bodem. De restterm van de waterbalans op basis van metingen representeert de netto kwel. Hierbij is aangenomen dat de bergingsverandering nihil is. Beide balansen komen redelijk goed overeen. Verschillen zien we terug met betrekking tot de verdamping (38 mm), de afvoer (75 mm) en de netto kwel (28 mm).

De waterbalans voor open water op basis van FutureView is weergegeven in

Tabel 13. De waterbalans voor het open water volgens metingen staat in Tabel 14. De berekende afvoer is 2002 ruim 10 miljoen m<sup>3</sup> lager dan de gemeten afvoer.

**Tabel 11: Waterbalans gehele polder Quarles van Ufford op basis van een verbeterd FutureViewR voor 2002.**

FutureViewR			
IN (mm j <sup>-1</sup> )		UIT (mm j <sup>-1</sup> )	
Neerslag:	864	Verdamping (ET(441) + Interceptie(54))	495
Kwel:	207	Wegzijging:	9
Aanvoer (Infiltratie (35) + Doorspoeling (132))	167	Afvoer (Drainage(495) + Runoff (31)+Overstort (3) Doorspoeling (132))	661
		RWZI	65
Som	1238	Som	1230
		Bodemberging (sluitpost)	8

**Tabel 12: Waterbalans gehele polder Quarles van Ufford op basis van metingen voor 2002.**

Metingen <sup>4</sup>			
IN (mm j <sup>-1</sup> )		UIT (mm j <sup>-1</sup> )	
Neerslag:	864	Verdamping:	457
Inlaat:	167	Afvoer:	736
		RWZI:	65
Som	1031	Som	1258
Netto Kwel (sluitpost)	227		

**Tabel 13: Waterbalans voor alleen het open water Quarles van Ufford dat via het hoofgemaal de polder verlaat op basis van een verbeterd FutureViewR voor 2002.**

FutureViewR			
IN (miljoen m <sup>3</sup> )		UIT (miljoen m <sup>3</sup> )	
Neerslag:	2,3	Verdamping:	1,3
Inlaat:	19,7	Afvoer:	76,2
Kwel	0,5	Wegzijging	nihil
Drainage	55,0	Infiltratie	3,7
Oppervlakte-afvoer	3,3		
Riooloverstort:	0,4		
Som	81,2	Som	81,2

**Tabel 14: Waterbalans open water Quarles van Ufford op basis van metingen voor 2002.**

Metingen <sup>5</sup>			
IN (miljoen m <sup>3</sup> )		UIT (miljoen m <sup>3</sup> )	
Neerslag:	2,3	Verdamping:	1,3
Inlaat:	19,7	Afvoer:	87,0
Som	22,0	Som	88,3
Drainage – Infiltratie + Kwel – Wegzijging + Oppervlakte-afvoer + Riooloverstort (Sluitpost)	66,3		

## 3.2 Waterbalans op maandbasis

### 3.2.1 Verdamping

Figuur 32 geeft de verdamping in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op het verbeterde FutureViewR. In de waterbalans op basis van

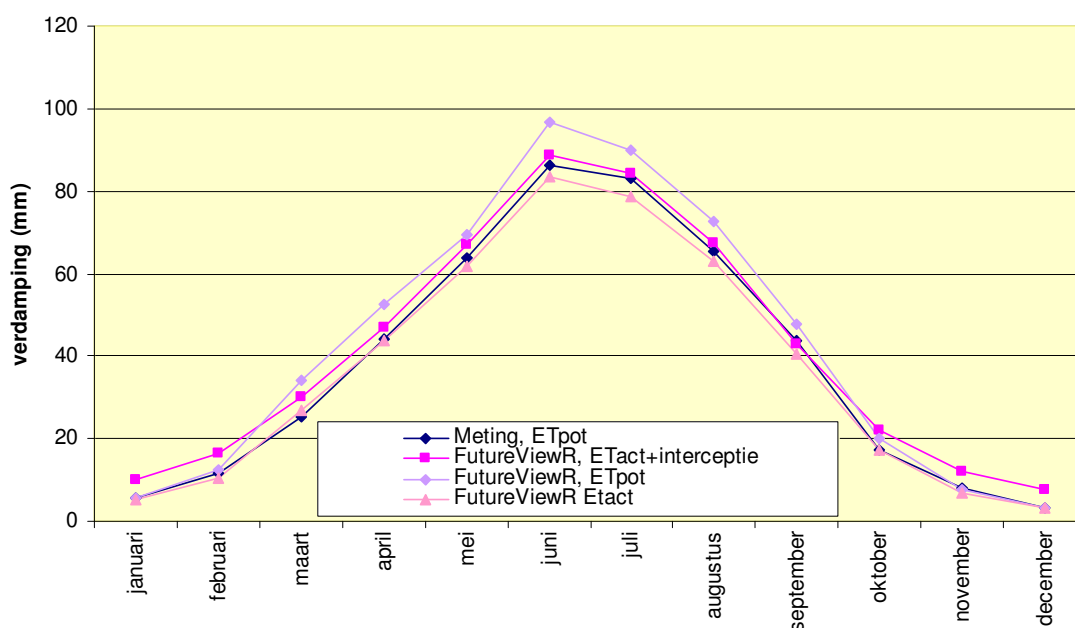
<sup>4</sup> Verdamping is niet direct gemeten maar afgeleid van de referentieverdamping volgens Makkink en gewasfactoren. Het betreft de potentiële verdamping.

<sup>5</sup> Verdamping is niet direct gemeten maar afgeleid van de referentieverdamping volgens Makkink en gewasfactoren. Het betreft de potentiële verdamping.



metingen is de potentiële verdamping opgenomen. De interceptieverdamping is niet meegenomen. In de waterbalans volgens FutureViewR is de som van actuele evapotranspiratie en de interceptieverdamping opgenomen in de waterbalans. Vergelijking met Figuur 7 laat duidelijk zien dat de aanpassingen in FutureViewR leiden tot een realistische berekening van de verdamping. Het verschil in deze balansterm is afgenomen van 11 mm per maand tot 3 mm per maand. De potentiële verdamping volgens FutureViewR is in de zomer nog steeds hoger. Dit wordt veroorzaakt door:

- Gewassenstelling in FutureViewR gebaseerd op overheersende landgebruik per 250x250 m rastercel. Gewassenstelling in waterbalans gebaseerd op metingen gebaseerd op de Landgebruikkaart van Nederland met een resolutie van 25x25 m.
- In FutureViewR zijn akkerbouwgewassen samengevoegd. In de waterbalans gebaseerd op metingen is de potentiële verdamping per gewas apart bepaald.
- In de waterbalans gebaseerd op metingen is aangenomen dat bebouwd gebied niet verdampt. In FutureviewR vindt op 30% van het bebouwd gebied verdamping plaats.

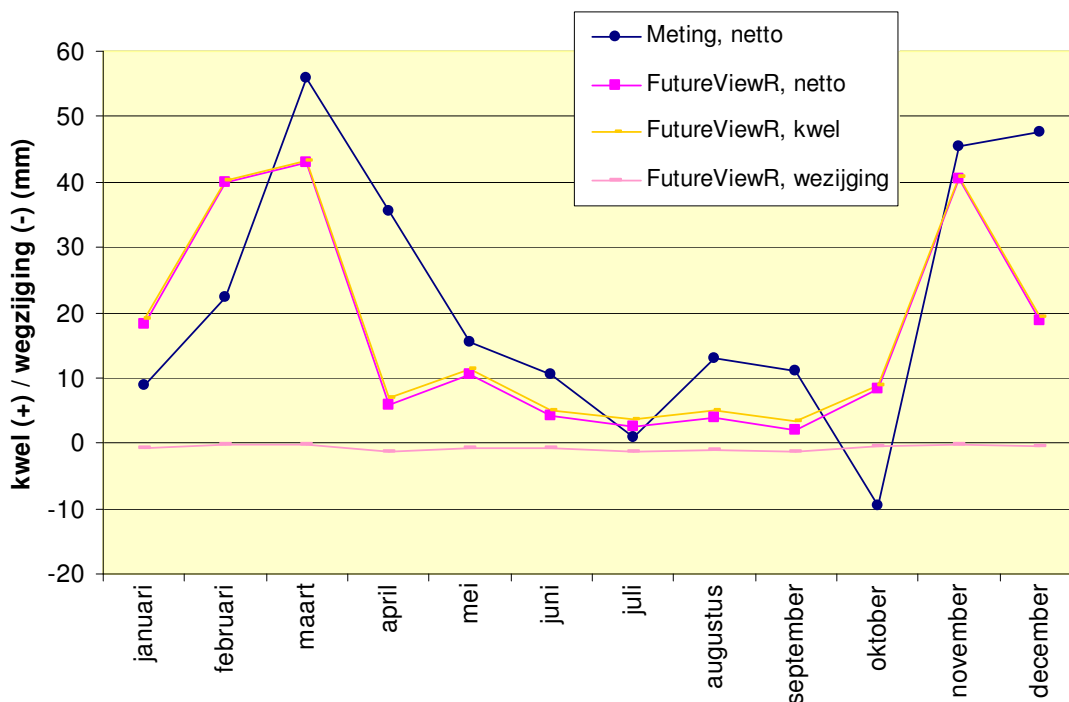


**Figuur 32: Verdamping in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureVlewR. Voor FutureViewR is naast de actuele verdamping zoals opgenomen in de waterbalans tevens de potentiële verdamping opgenomen en weergegeven zonder meetelling van de interceptieverdamping.**

### 3.2.2 Kwel en Wegzijing

Figuur 33 geeft de kwel en wegzijing in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op het verbeterde FutureViewR. Voor de waterbalans gebaseerd op metingen is de netto kwel of wegzijing gebaseerd op de restterm van de waterbalans rekening houdend met de maandelijkse bergingsverandering. Uit Bijlage I blijkt dat de inschatting van de bergingsverandering volgens Koskamp (2007) geen realistisch patroon van kwel en wegzijing laat zien. Daarom is in Figuur 33 een bergingsverandering zoals berekend door FutureViewR aangenomen. Voor FutureViewR is behalve de netto-term tevens de kwel en wegzijing afzonderlijk opgenomen. Vergelijking met de figuur in Bijlage I laat zien dat netto kwel volgens FutureViewR en volgens metingen beter overeenstemmen. Dit komt met name door de verbeterde inschatting van de maandelijkse bergingsverandering. Met de aanpassingen in FutureViewR wordt meer kwel en meer wegzijing berekend. Daar volgens deze berekeningen

de kwel meer toeneemt dan de wegzijging is de netto kwel gemiddeld 3 mm per maand hoger dan voor de aanpassing in FutureViewR. Afwijkingen tussen beide waterbalansen kan voor april en oktober veroorzaakt worden door de overgang van winter- naar zomerpeil en omgekeerd. In FutureViewR is aangenomen dat deze overgang plaatsvindt op resp. 1 april en 1 oktober. In werkelijkheid kan deze datum afwijken.



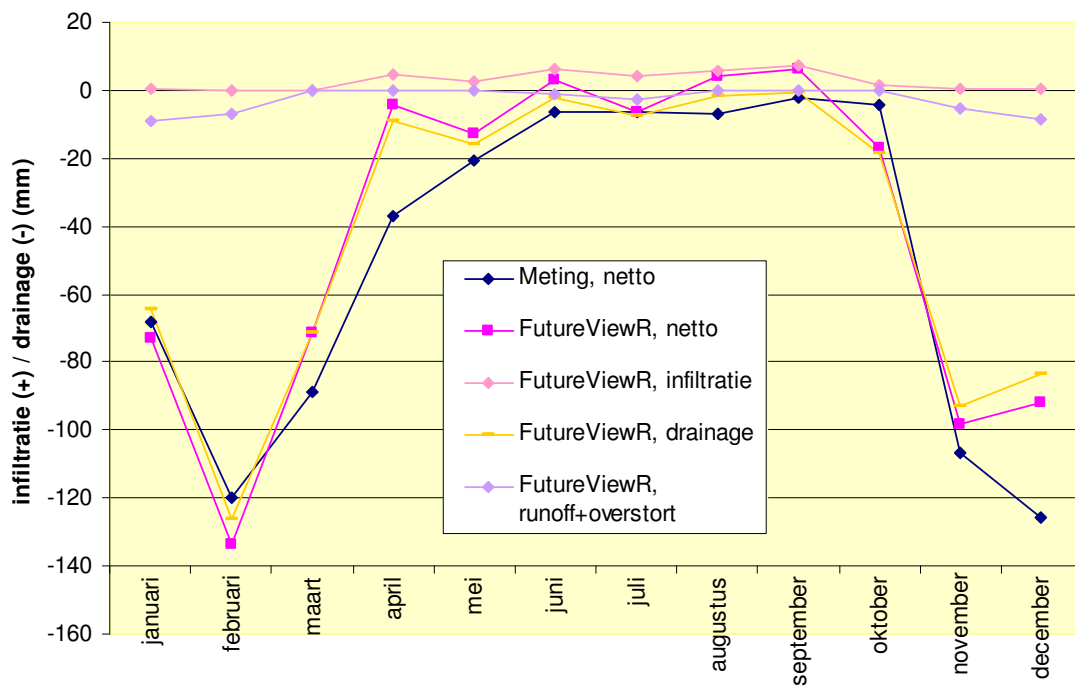
**Figuur 33: Netto kwel (positief) en wegzijging (negatief) in 2002 volgens de maandelijkse waterbalansen gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. Voor FutureViewR zijn tevens de afzonderlijke kwel- en wegzijgingstermen opgenomen.**

### 3.2.3 Infiltratie, drainage en oppervlakte-afvoer

Figuur 34 geeft infiltratie, drainage en oppervlakte-afvoer in 2002 volgens de maandelijkse waterbalansen gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. In de waterbalansen op basis van metingen is de waterbalans voor het oppervlaktewater gebruikt. Hierbij is een inschatting gemaakt van de bergingsverandering bij omschakeling van zomer- naar winterpeil en omgekeerd. Het aandeel neerslag en verdamping is verwaarloosd. De netto-term is gebaseerd op de restterm van de waterbalans. Voor FutureViewR is behalve de netto-term tevens de infiltratie, drainage en oppervlakte-afvoer afzonderlijk opgenomen. Het patroon van de netto-term volgens metingen en volgens FutureViewR is vergelijkbaar. Vergelijking met Figuur 24 en Bijlage I laat zien dat de aanpassing van FutureViewR leidt tot een hogere berekening van de drainage wat beter overeenkomt met de metingen.

Op grond van de vergelijking van de waterbalansen van het aangepaste FutureViewR model en metingen wordt geconcludeerd dat het FutureView model goed de werkelijkheid simuleert en gebruikt kan worden voor scenario analyses. In hoofdstuk 4 wordt gekeken in hoeverre het vervangen van neerslag volgens station Megen door regenradar invloed heeft op de gesimuleerde hydrologische processen. In hoofdstuk 5 wordt het effect van klimaat- en landgebruiksscenario's op de hydrologische processen in beeld gebracht.





**Figuur 34: Netto infiltratie (positief) of drainage (negatief) in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. Voor FutureViewR zijn tevens de afzonderlijke infiltratie en drainage opgenomen.**





## 4 Regenradar

In FutureViewR is neerslag als modelinvoer opgegeven volgens station Megen. In dit hoofdstuk wordt onderzocht in hoeverre het gebruik van regenradar in plaats van deze stationsgegevens leidt tot een gewijzigde simulatie van hydrologische processen in de polder Quarles van Ufford. Eerst wordt ingegaan op de gebruikte regenradar data (§4.1). Vervolgens wordt de modelinvoer, neerslag volgens regenradar en volgens Megen, vergeleken (§4.2). Tenslotte wordt de modeluitvoer, de hydrologische processen, vergeleken (§4.3).

### 4.1 Theorie en Data

Waterschap Rivierenland beschikt voor de periode 2000 tot heden over regenradar gegevens met een resolutie van ongeveer 2,5 bij 2,5 km voor haar totale beheersgebied. De historische data zijn eenmalig aangekocht bij MeteoConsult in Wageningen en sinds 2006 worden online de meest recente data opgehaald.

Het KNMI heeft twee operationele Doppler radars, één in De Bilt en één in Den Helder, die worden gebruikt voor het meten van neerslag boven Nederland. Deze radars zenden radiostraling. Deze straling verstrooid onder andere aan vallende regendruppels. De intensiteit van de terugkomende, verstrooide radiofrequente straling wordt gemeten. Onder de aanname van een diameter-distributie van neerslagdruppeltjes en een afhankelijkheid van de valsnelheid van druppeltjes met hun diameter, kan de radarreflectiviteit worden omgerekend naar een hoeveelheid neerslag per tijdseenheid.

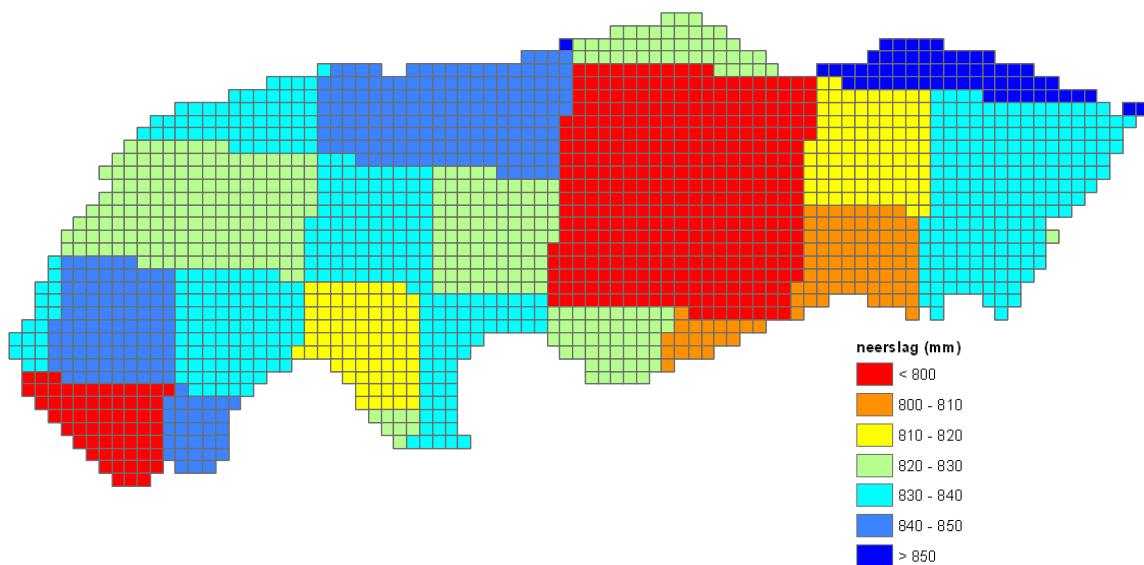
Het product van het KNMI is een ongekalibreerd radarbeeld: een horizontale dwarsdoorsnede van een drie-dimensionale reflectiviteitsverdeling op uurbasis op een hoogte van 0,8 km. Vervolgens zijn deze ongekalibreerde radarbeelden door MeteoConsult gekalibreerd aan de hand van een negental meteorologische stations, waarvan alleen het meteorologische station Herwijnen zich binnen het beheersgebied van het waterschap bevindt. Deze radargegevens zijn op dagbasis aanvullend gecorrigeerd aan de hand van 14 meteorologische stations binnen het beheersgebied van waterschap Rivierenland (Immerzeel, 2007b).

Voor dit onderzoek zijn deze gecorrigeerde radargegevens op dagbasis gebruikt. De analyse heeft plaats gevonden voor het jaar 2004. In dit jaar waren de radardata het meest compleet.

### 4.2 Modelinvoer: Neerslag Megen versus Radar

Oorspronkelijk was de neerslag volgens station Megen opgelegd aan iedere plot binnen het FutureViewR model van de polder Quarles van Ufford. Om een vergelijking mogelijk te maken is de modelinvoer gewijzigd door aan iedere FutureViewR-plot neerslag op te leggen volgens de regenradar. Hiertoe is een zogenaamde overlay gemaakt tussen de plots van het FutureViewR model en het ruimtelijke raster van de regenradar. Op deze wijze zijn als het ware 37 radar neerslagstations gedefinieerd. Aan ieder SWAP-model van FutureViewR is de neerslag volgens één van deze 37 stations opgelegd. Figuur 35 geeft een overzicht van de ruimtelijke verdeling van de neerslag voor het jaar 2004. Volgens regenradar valt er gemiddeld 822 mm in de polder. Ter vergelijking: volgens het oorspronkelijke model was de neerslag overal in de polder 836 mm.



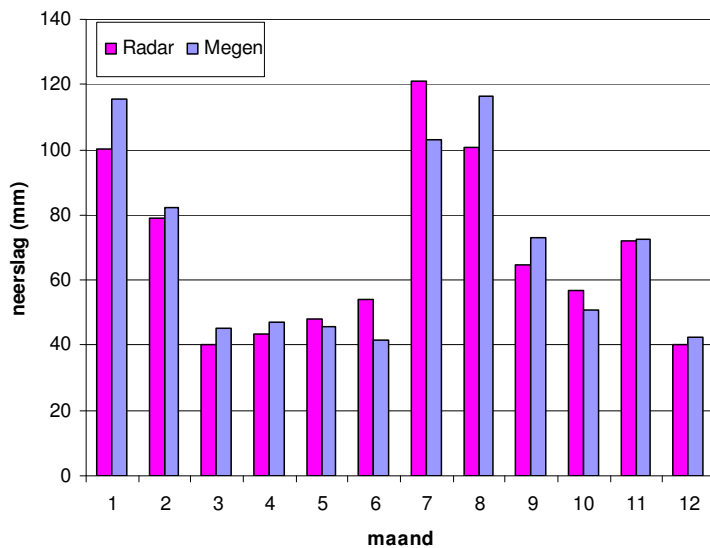


**Figuur 35: Neerslag in 2004, invoer voor FutureViewR, volgens regenradar.**

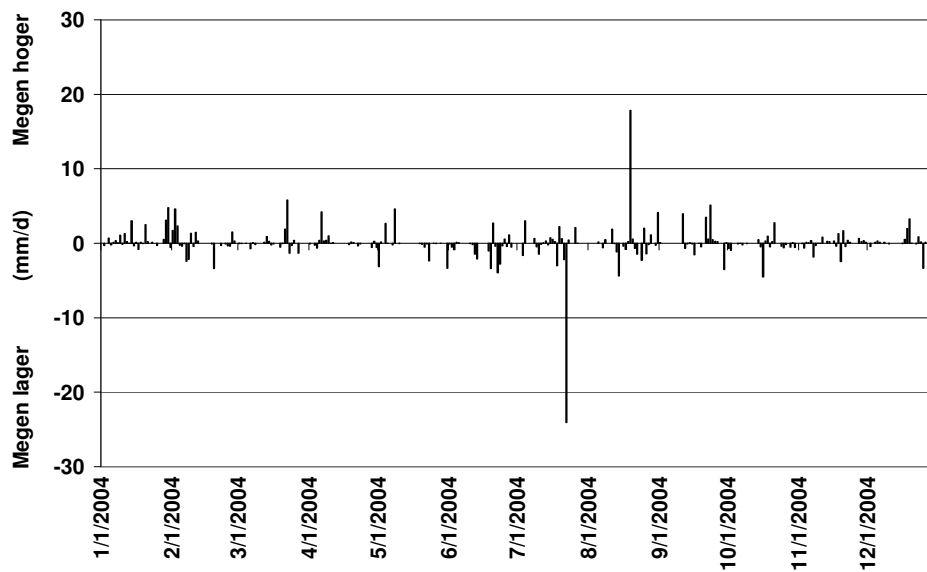
Volgens de radar valt dus minder neerslag dan volgens station Megen.

Figuur 36 geeft de verschillen op maandbasis weer. Uit deze figuur blijkt dat in de maanden mei, juni, juli en oktober volgens de radar juist meer neerslag valt. De afwijkingen tussen station Megen en de regenradar is het groots in januari en in de zomermaanden. Figuur 37 laat zien dat de verschillen in juli en augustus met name veroorzaakt worden door een enkele uitschieters op dagbasis. Dit heeft te maken met het plaatselijk voorkomen van hevige buien in de zomerperiode. In januari is de neerslag volgens station Megen structureel hoger dan de radar. Figuur 38a laat zien dat er geen duidelijk verband is tussen de verschillen in neerslag volgens Megen en Radar en de intensiteit van de neerslag. Uit deze figuur is eveneens op te maken dat de neerslag volgens Megen op bepaalde dagen veel hoger of lager is dan het gemiddelde radarbeeld. Dit zijn met name de eerder genoemde hevige convectieve buien in de zomer. In Figuur 38b en Figuur 38c is niet het gemiddelde radarbeeld geplot maar respectievelijk de maximale en minimale waarde. Hiermee geven deze figuren een indruk van de ruimtelijke variabiliteit van de neerslag op dagbasis.



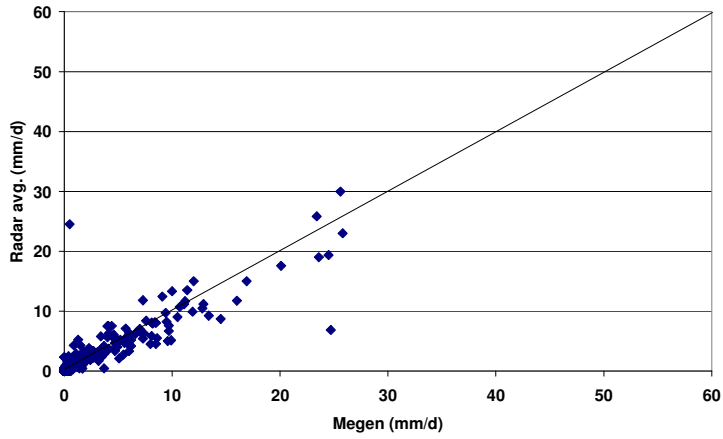


Figuur 36: Maandelijkse neerslag volgens de Radar en volgens station Megen.

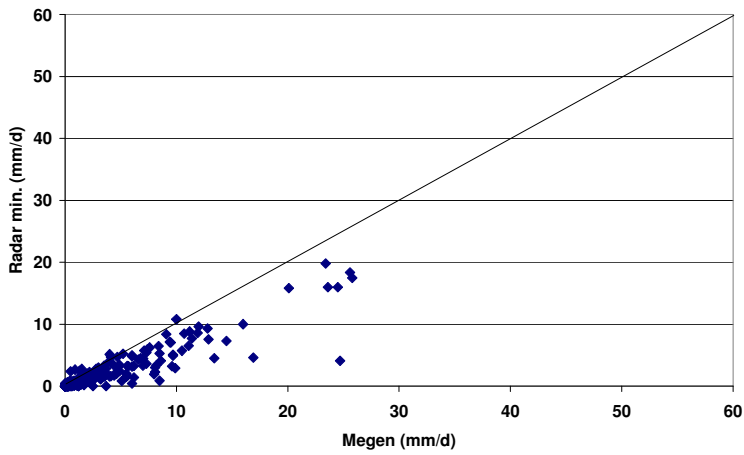


Figuur 37: Verschil in neerslag op dagbasis tussen station Megen en het gemiddelde van de regenradar over de 37 rasterplots van Quarles van Ufford.

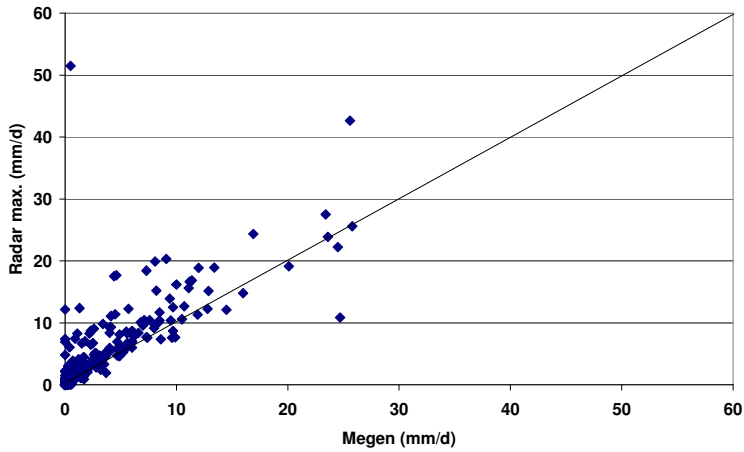
a



b



c



**Figuur 38: Scatterplot neerslag volgens gemiddeld radarbeeld (a), volgens minimum in het radarbeeld (b) en volgens maximum in het radarbeeld (c). Alle radargegevens zijn uitgezet ten opzichte van station Megen.**

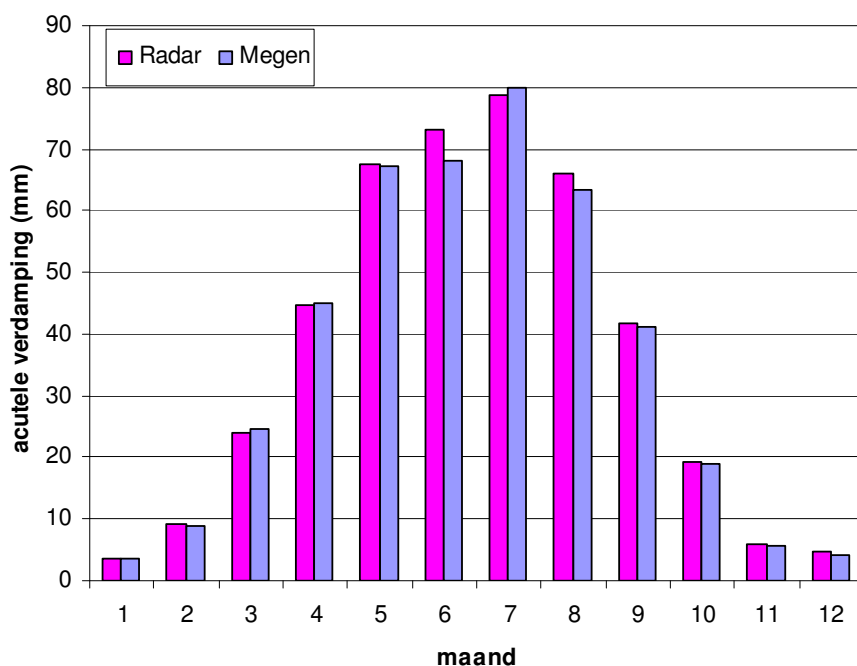


### 4.3 Effect op hydrologische processen

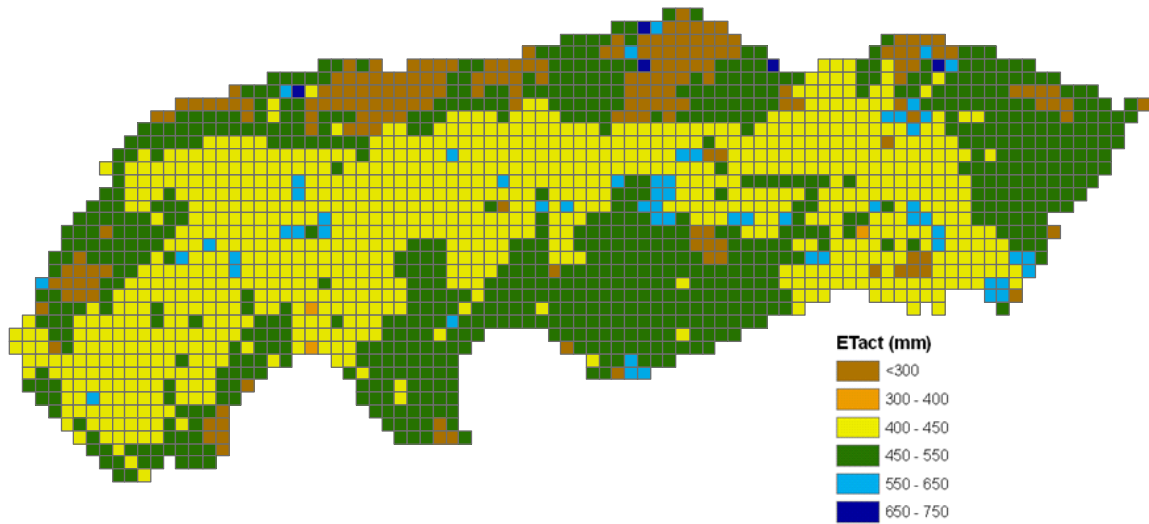
#### 4.3.1 Verdamping

Volgens FutureViewR is de actuele verdamping in 2004 bij gebruik van neerslaggegevens volgens radar 439 mm. Ter vergelijking: volgens het oorspronkelijke model was de actuele verdamping 431 mm. Dus hoewel er volgens de radar in 2004 minder neerslag valt is de actuele verdamping iets hoger. Dit is te verklaren door de gewijzigde neerslagverdeling. Figuur 39 laat zien dat met name in juni en augustus de verdamping achterblijft indien de neerslag van station Megen gebruikt wordt. In juni valt volgens de radar meer neerslag hetgeen het verschil kan verklaren. Echter in augustus valt volgens de radar minder neerslag. Het verschil moet dan gezocht worden in de gewijzigde ruimtelijke verdeling van de neerslag of een gunstigere verdeling van de neerslag binnen de maand.

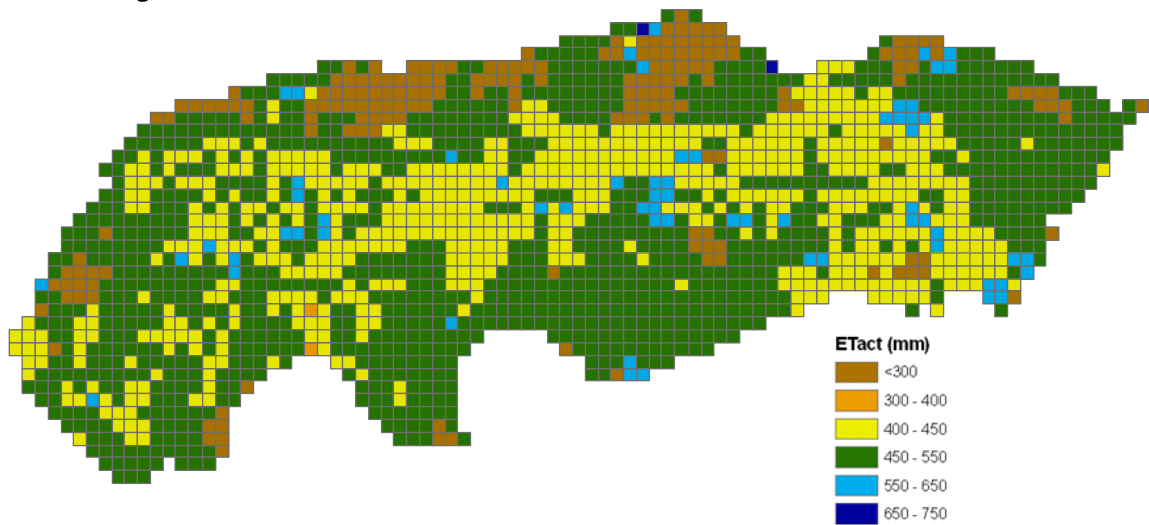
Figuur 40 en Figuur 41 geven de ruimtelijke verdeling van de actuele verdamping in 2004 zoals berekend met FutureViewR met neerslag volgens respectievelijk Megen en regenradar. Voor de duidelijkheid is tevens een verschilplaatje (Figuur 42) opgenomen. Opvallend is dat de ruimtelijke verschillen in jaarlijkse neerslag niet leiden tot een vergelijkbaar patroon in verdamping. Met name op de kleigronden wordt een hogere verdamping berekend wanneer regenradar invoer is. Mogelijk infiltreert hier met regenradar invoer meer water in de grond dat effectief gebruikt kan worden voor gewasverdamping. De neerslag volgens station Megen wordt mogelijk voor een groot deel oppervlakkig afgevoerd en komt daarmee niet ten goede aan de gewasverdamping.



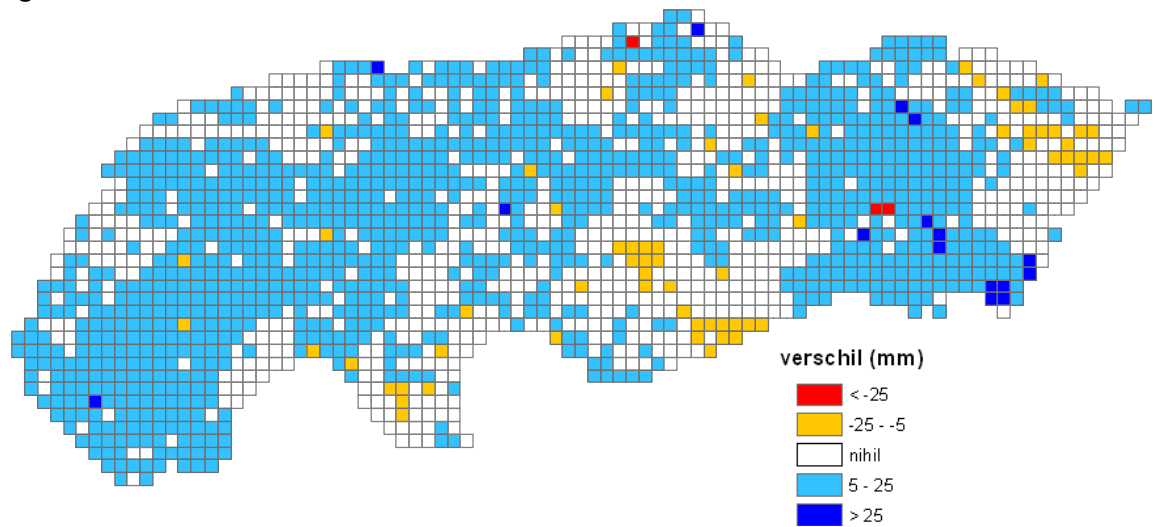
**Figuur 39: Maandelijke actuele verdamping berekend met FutureViewR met neerslag volgens Radar en volgens station Megen.**



**Figuur 40: Actuele verdamping in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens station Megen.**



**Figuur 41: Actuele verdamping in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar.**



**Figuur 42: Verschil in actuele verdamping in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar en neerslag volgens station Megen (positief betekent meer verdamping volgens radar, negatief betekent minder verdamping volgens radar).**



### 4.3.2 Kwel en Wegzijing

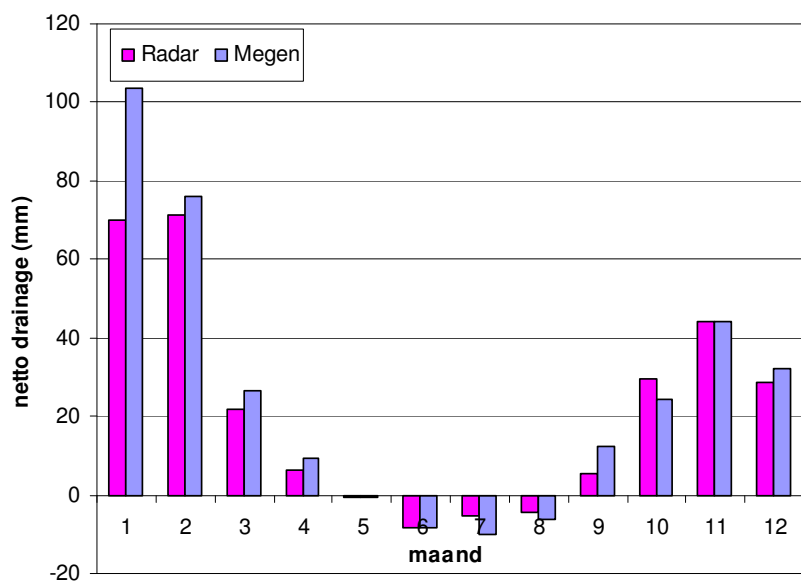
Volgens FutureViewR wijzigt kwel en wegzijging niet als gevolg van het omschakelen van neerslag volgens Megen naar neerslag volgens regenradar. In beide gevallen is de netto kwel 50 mm. Zowel ruimtelijk als temporeel is het beeld identiek.

### 4.3.3 Drainage en infiltratie

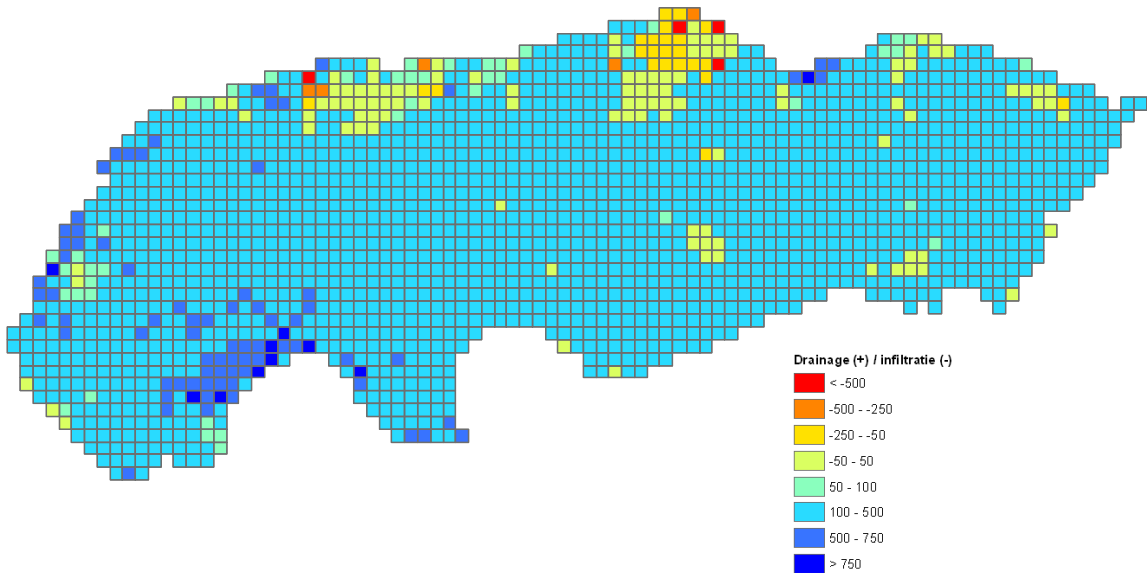
Volgens FutureViewR is de netto drainage in 2004 bij gebruik van neerslaggegevens volgens radar 258 mm. Ter vergelijking: volgens het oorspronkelijke model was dit 303 mm. De extra neerslag volgens station Megen ten opzichte van regenradar draineert dus voor een groot deel naar het oppervlaktewater.

Figuur 43 laat de maandelijkse drainage en infiltratie zien. Vergelijking met Figuur 36 bevestigt dat het verschil in drainage het verschil in neerslag volgt.

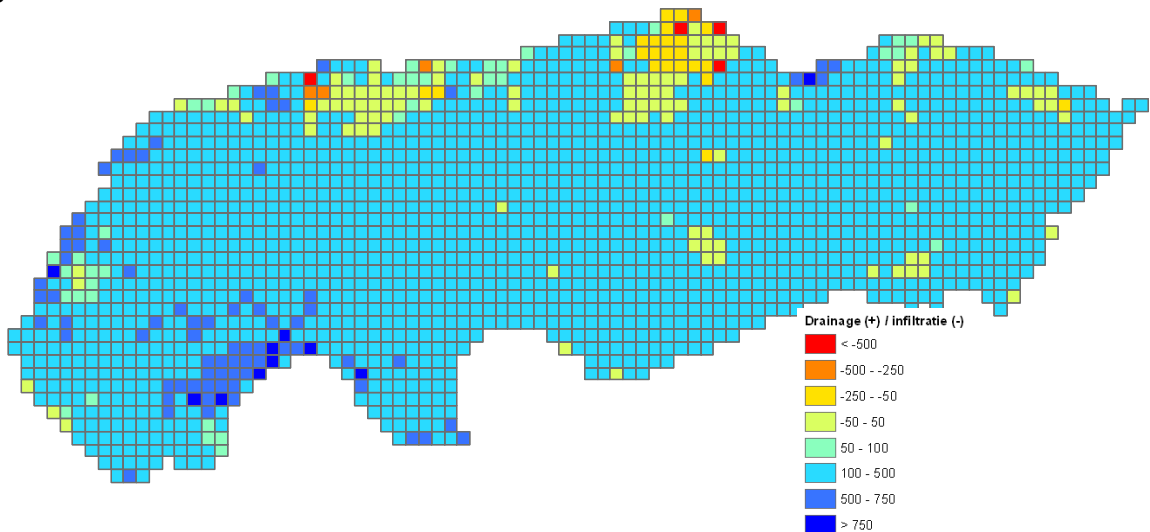
Figuur 44 en Figuur 45 geven de ruimtelijke verdeling van drainage en infiltratie in 2004 zoals berekend met FutureViewR met neerslag volgens respectievelijk Megen en regenradar. Voor de duidelijkheid is tevens een verschilplaatje (Figuur 46) opgenomen. Hieruit is op te maken dat zowel de drainage als de infiltratie lager is bij gebruik van de regenradar data.



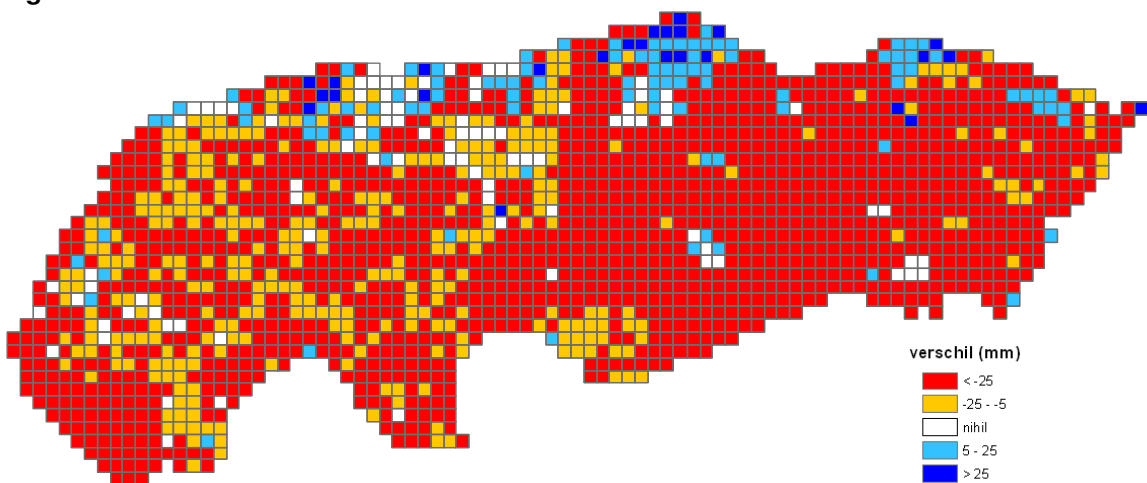
**Figuur 43: Maandelijkse drainage of infiltratie berekend met FutureViewR met neerslag volgens radar en volgens station Megen.**



**Figuur 44: Drainage en Infiltratie in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens Megen.**



**Figuur 45: Drainage en Infiltratie in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar.**



**Figuur 46: Verschil in drainage en infiltratie in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar en neerslag volgens station Megen (rode kleuren indiceren minder drainage volgens radar, blauwe kleuren indiceren minder infiltratie volgens radar).**



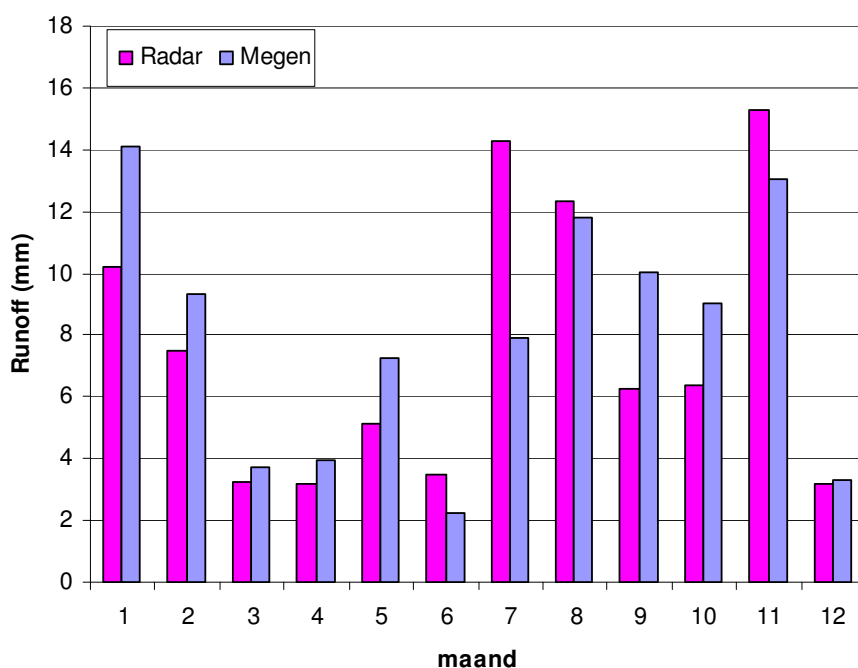


#### 4.3.4 Oppervlakte-afvoer en riooloverstort

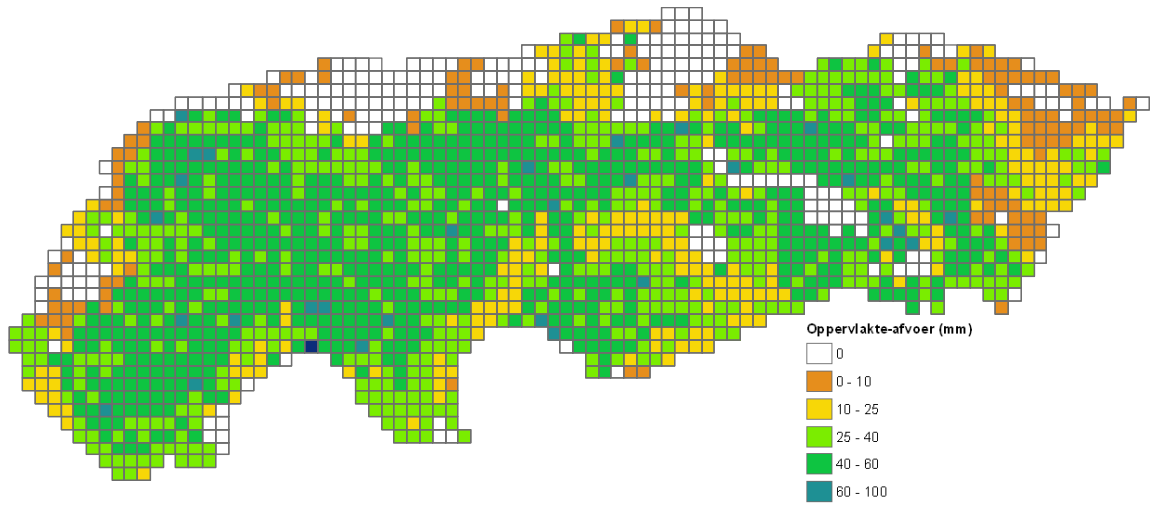
Volgens FutureViewR is de totale oppervlakte-afvoer in 2004 bij gebruik van neerslaggegevens volgens radar 90 mm. Dit is een afname van 6 mm vergeleken met het oorspronkelijke model met neerslag volgens station Megen. Figuur 47 laat zien dat de verschillen op maandbasis veel variatie vertonen. Vanzelfsprekend is er een duidelijke relatie met de maandelijkse neerslagverschil weergegeven in

Figuur 36. De combinatie van beide figuren geeft informatie over de intensiteit van de neerslag in de verschillende maanden. Zo is duidelijk dat in augustus en oktober volgens de radar de buien intenser waren dan volgens Megen. In mei geldt het tegenovergestelde.

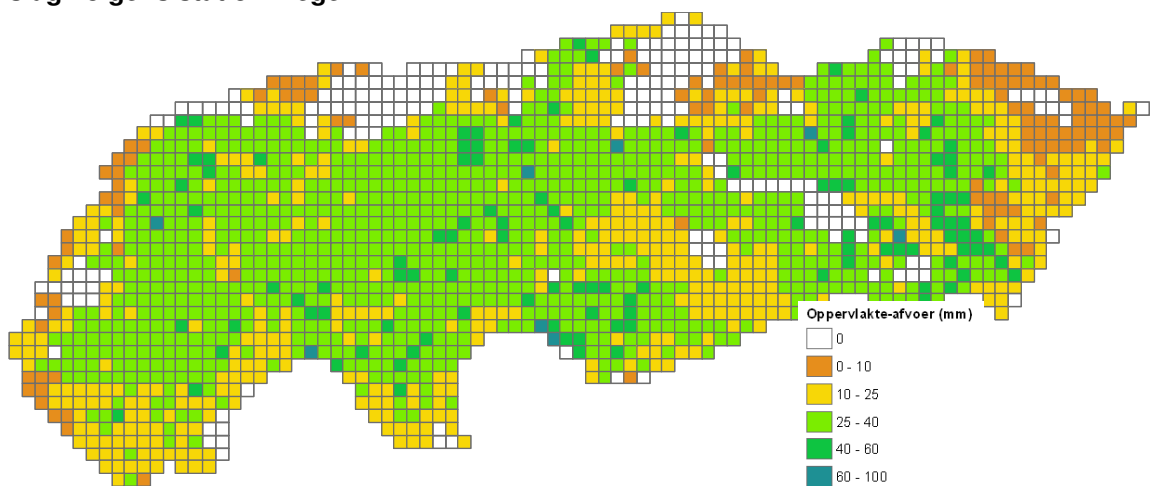
Figuur 48 en Figuur 49 geven de ruimtelijke verdeling van oppervlakte-afvoer in landelijk gebied. Voor de duidelijkheid is tevens een verschilplaatje (Figuur 50) opgenomen. De oppervlakte-afvoer in landelijk gebied is met neerslag volgens station Megen duidelijk hoger. De riooloverstort met neerslag volgens station Megen is voor alle stedelijke plots gelijk (42 mm in 2004). Onder invloed van de ruimtelijke verdeling van de neerslag volgens de radarbeelden is er eveneens een ruimtelijke verdeling van de hoeveelheid riooloversort (zie Figuur 51). Deze hoeveelheid kan hoger of lager zijn dan de overstort met neerslag volgens station Megen (zie Figuur 52)



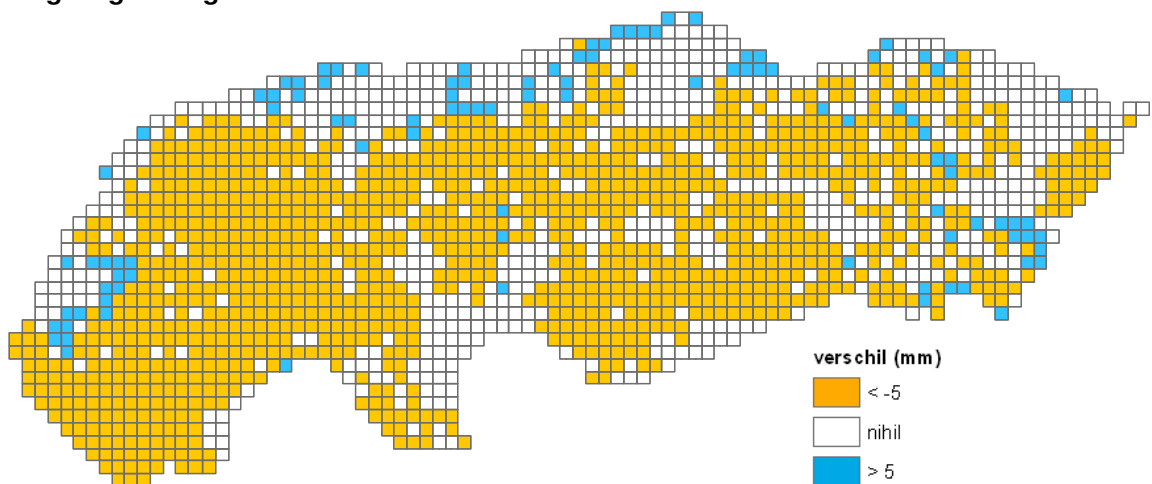
**Figuur 47: Maandelijks Runoff (som van oppervlakte afvoer, afvoer naar RWZI en riooloverstort) berekend met FurureViewR met neerslag volgens radar en volgens station Megen.**



**Figuur 48: Oppervlakte-afvoer in landelijk gebied in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens station Megen.**

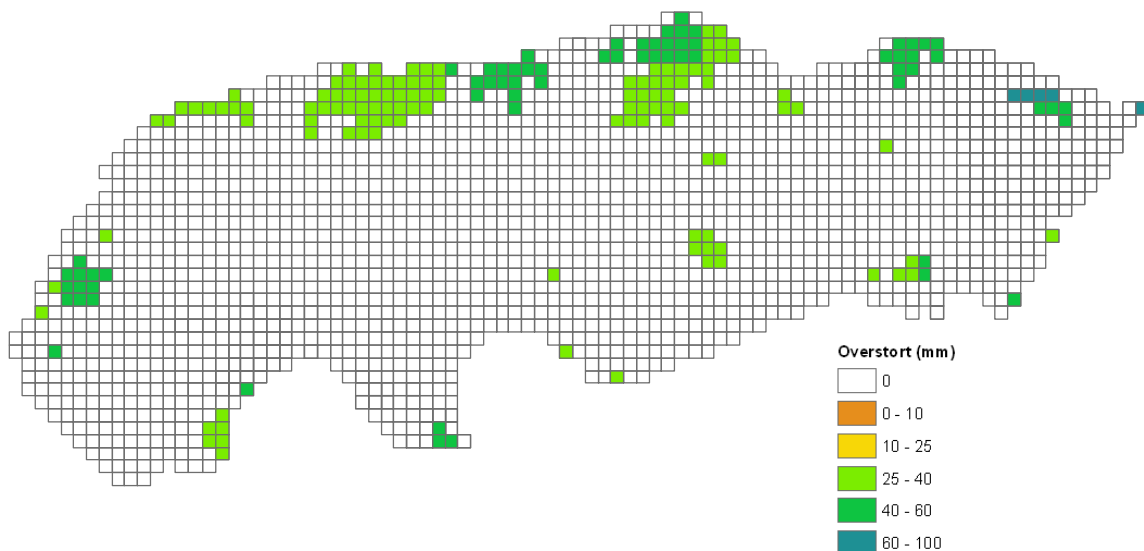


**Figuur 49: Oppervlakte-afvoer landelijk gebied in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar.**

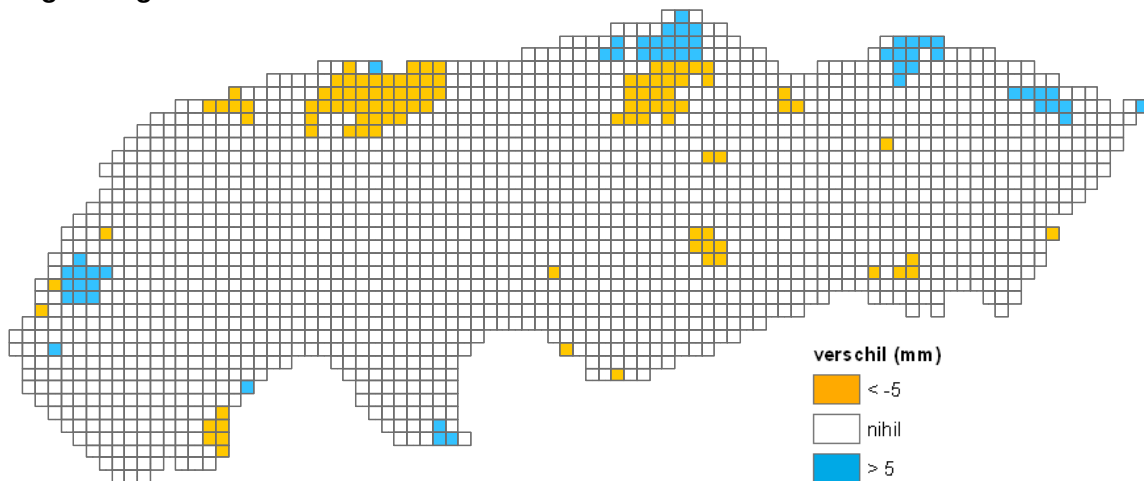


**Figuur 50: Verschil in Oppervlakte-afvoer landelijk gebied in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar en neerslag volgens station Megen (positief betekent meer oppervlakte-afvoer volgens radar, negatief betekent minder oppervlakte-afvoer volgens radar).**





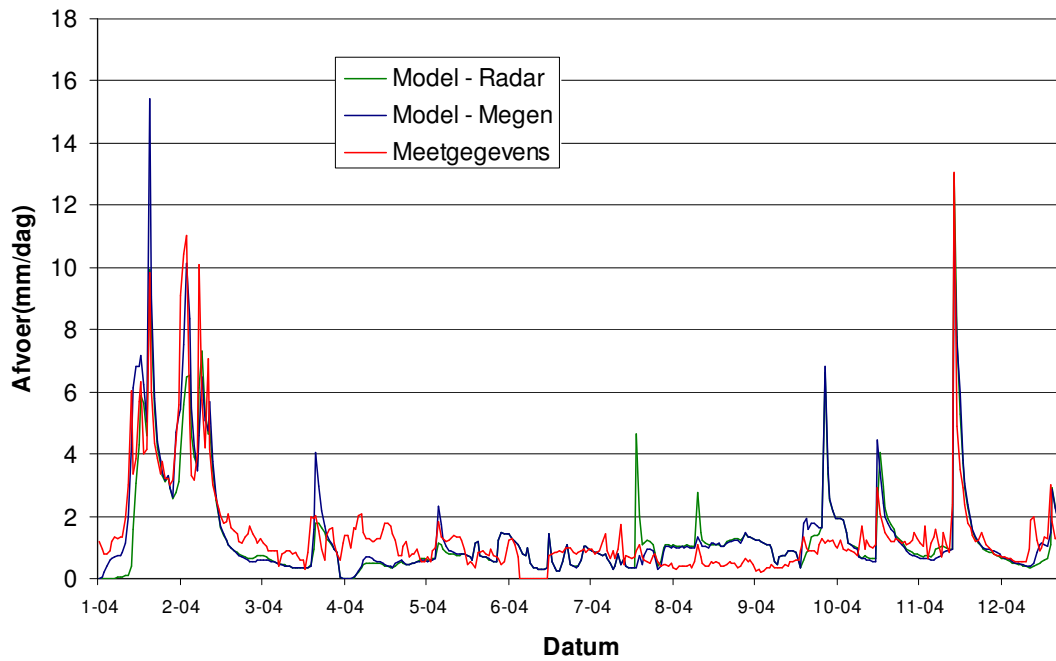
**Figuur 51: Riooloverstort in stedelijk gebied in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar.**



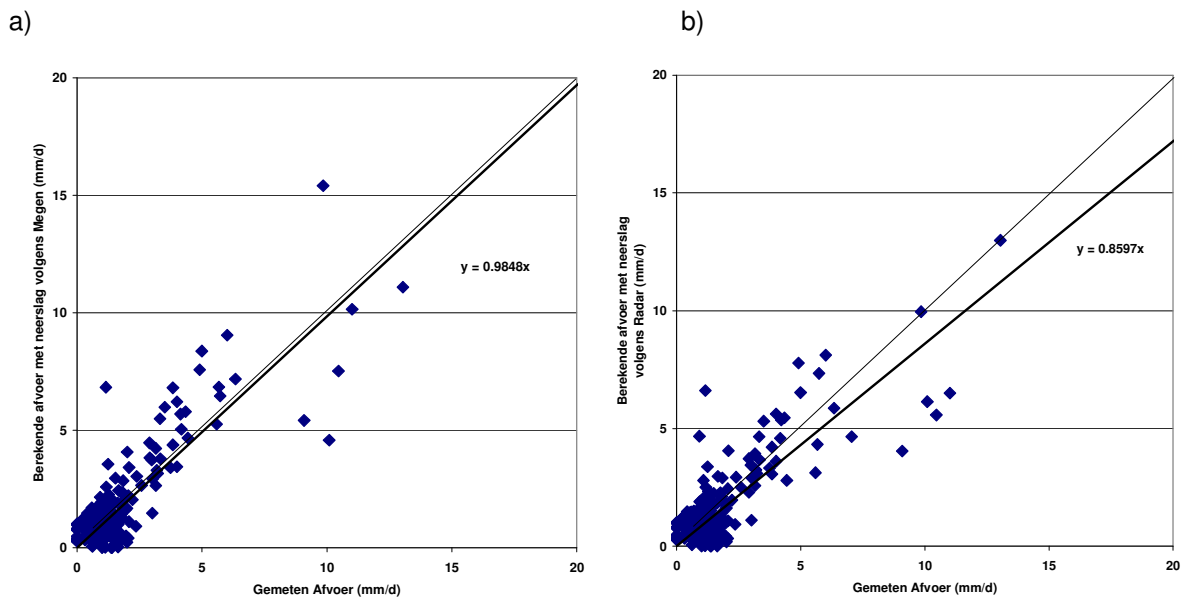
**Figuur 52: Verschil in riooloverstort in stedelijk gebied in 2004 volgens FutureViewR met neerslag volgens regenradar en neerslag volgens station Megen (positief betekent meer riooloverstort volgens radar, negatief betekent minder riooloverstort volgens radar).**

#### 4.3.5 Afvoer

Figuur 53 geeft de gesimuleerde afvoer weer bij het hoofdgemaal van de polder. Met name de gesimuleerde afvoerpieken geven verschillen tussen het gebruik van neerslag volgens radar en volgens station Megen. Wanneer de gesimuleerde afvoer wordt vergeleken met meetgegevens geeft neerslag volgens station Megen betere resultaten (zie ook Figuur 54). Alleen de afvoerpiek eind maart wordt door regenradar beter gesimuleerd. In het radaronderzoek voor Waterschap Rivierenland werd geconcludeerd dat extreme neerslag structureel wordt onderschat door de radar (Immerzeel, 2007b). In deze studie zijn de gecorrigeerde radarbeelden gebruikt, maar lijkt er nog steeds sprake te zijn van een onderschatting.



**Figuur 53: Vergelijking van de gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder met neerslag volgens radar en volgens station Megen. Tevens is de gemeten afvoer weergegeven.**



**Figuur 54: Scatterplot berekende afvoer met neerslag volgens station Megen versus gemeten afvoer (a) en Scatterplot berekende afvoer met neerslag volgens Radar versus gemeten afvoer. Het betreft de afvoer bij het hoofdgemaal van de polder.**



## 5 Klimaat en Landgebruik scenario's

### 5.1 Scenario's en modelinvoer

De effecten van klimaatverandering in de polder Quarles van Ufford zijn afhankelijk van drie verschillende variabelen:

- De te verwachten klimaatverandering
- De te verwachten rivierwaterstanden
- De te verwachten landgebruikveranderingen

In de eerdere studie (Immerzeel et al., 2007) is het W+ scenario van het KNMI gebruikt (Hurk van den, 2006). Er is toen een periode rond het jaar 2050 gesimuleerd door een reeks van 1995-2004 te transformeren aan de hand van een aantal statistische parameters over klimaatverandering. De toekomstige rivierwaterstanden werden afgeleid uit voorlopige berekeningen door het RIZA. Inmiddels zijn herziene berekeningen beschikbaar. Toekomstige landgebruiksveranderingen werden tot nu toe niet meegenomen.

Deze drie aspecten van de veranderende toekomst (klimaat, rivierstanden, landgebruik) kunnen niet los van elkaar gezien worden. Er is gekozen om twee scenario's integraal door te rekenen met als zichtjaar 2050:

- G+: KNMI G+, rivierafvoeren G+, landgebruik volgens het voor G+ aangepaste trendscenario 2040
- W+: KNMI W+, rivierafvoeren W+, landgebruik volgens het voor W+ aangepaste trendscenario 2040

Deze paragraaf gaat nader in op deze scenario's. §5.1.1 gaat in op klimaatverandering, §5.1.2 op verandering van rivierwaterstanden en §5.1.3 op landgebruiksverandering.

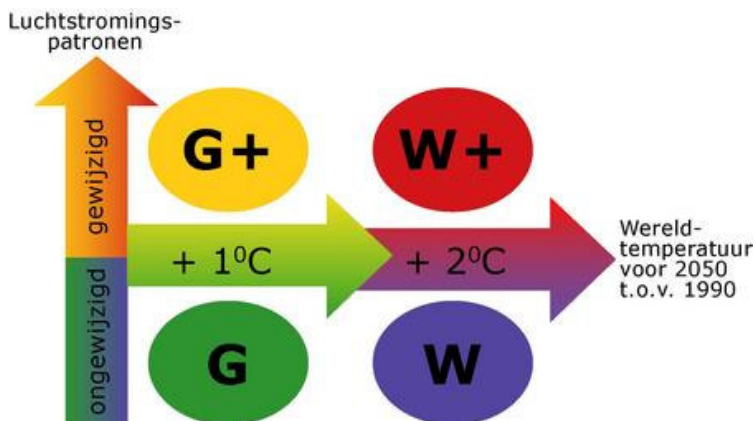
#### 5.1.1 KNMI'06 Scenario's

In 2006 zijn door het KNMI nieuwe klimaatscenario's voor Nederland opgesteld (KNMI, 2006) ter vervanging van de oude WB21-klimaatscenario's (KNMI, 1999).

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 zijn gebaseerd op de resultaten van de zogenoemde "General Circulation Models" (GCM's). Deze modellen geven aan dat de wereldgemiddelde temperatuur rond 2050 hoogst waarschijnlijk ergens tussen de +1° C en +2° C uitkomt.

Deze temperatuurstijgingen vormen en 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 milder en natter. Sommige klimaatmodellen voorspellen in de winter een sterkere westelijke stroming en in de zomer meer oostenwind. Dit laatste gaat gepaard met een grotere kans op warm en droog weer. Echter, de verschillende modellen wijken sterk van elkaar af. De klimaatscenario's nemen deze onzekere veranderingen





Code	Naam	Toelichting
G	Gematigd	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
G+	Gematigd +	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind
	Warm	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen West Europa
W+	Warm +	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 t.o.v. 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind

Figuur 55: Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

Tabel 15: : Klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van het basisjaar 1990 volgens de vier KNMI'06 scenario's

		2050			
		G	G+	W	W+
Winter	Gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
Zomer	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	Potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%



mee. Bij de scenario's G en W wordt uitgegaan van een zwakke verandering in de atmosferische circulatie, bij de scenario's G+ en W+ van een sterke verandering. De KNMI scenario's zijn stuk voor stuk aannemelijk, maar met de huidige kennis is niet aan te geven welk scenario het meest waarschijnlijk is.

Net als voor de WB21 klimaatscenario's worden er in de KNMI'06 klimaatscenario's getallen gegeven voor de verandering van neerslag, temperatuur, potentiële verdamping, wind en zeeniveau. Behalve seizoensgemiddelde waarden worden tevens 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. In Tabel 15 is de klimaatverandering rond 2050 uitgedrukt in cijfers per KNMI'06 scenario. Voor meer achtergronden over de KNMI scenario's wordt verwezen naar Van den Hurk *et al.* (2006).

Voor het G+ en het W+ scenario is de neerslag en potentiële verdamping van een bestaande 10-jarige tijdsreeks van (1995-2004) getransformeerd naar een 10-jarige reeks rond het jaar 2050. Voor neerslag is gebruik gemaakt van station Megen. Voor potentiële verdamping van station Herwijnen.

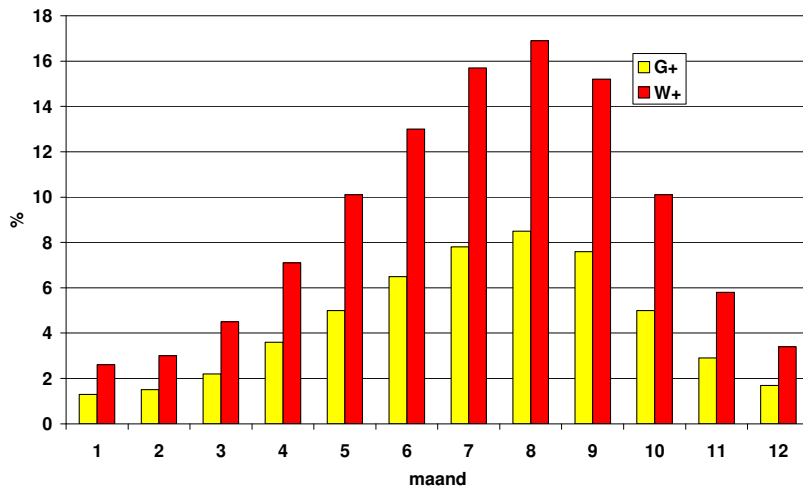
Bij het transformeren van tijdreeksen dienen de volgende kanttekeningen geplaatst te worden.

- 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.

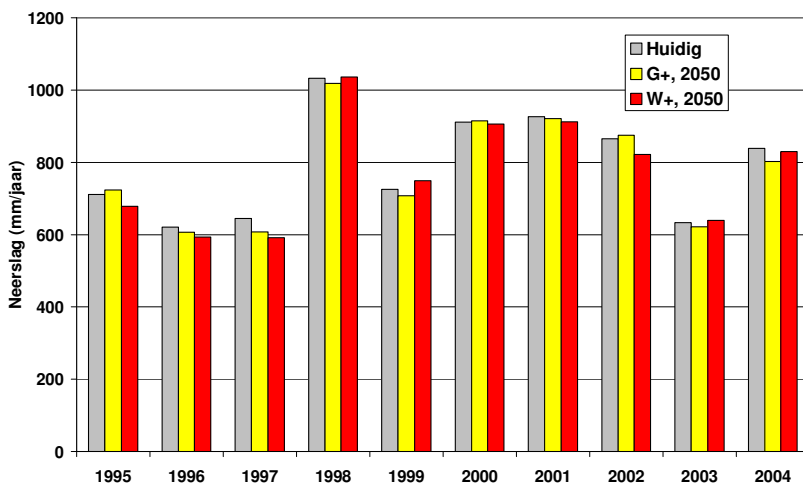
Om de neerslag reeks te transformeren wordt gebruik gemaakt van drie variabelen op maandbasis: de veranderingen in het aantal natte dagen, de gemiddelde hoeveelheid regen op een natte dag en het 99% percentiel van de neerslaghoeveelheid (Hurk van der, 2006). Voor potentiële verdamping is de procentuele verandering per maand aan de waargenomen tijdserie opgelegd (zie Figuur 56, Lenderink, 2006).

De gemiddelde jaarlijkse neerslag voor de 10-jarige periode neemt af van 791 mm in de huidige situatie tot 780 voor het G+ scenario en 776 voor het W+ scenario. Figuur 57 geeft een indruk van de variatie van de jaargemiddelde neerslag binnen de 10-jarige periode. Figuur 58 geeft de gemiddelde neerslag per maand weer. In de zomer neemt de neerslag volgens de toekomstscenario's af terwijl de neerslag in de winter juist toe zal nemen. Hierbij is het W+ scenario extremer dan het G+scenario. Opvallend is dat de verdeling van de neerslag binnen een jaar bepaalt of de jaargemiddelde neerslag volgens de toekomstscenario's hoger of lager is dan in de huidige situatie. Deze neerslagverdeling bepaalt tevens het jaarlijkse verschil tussen de toekomstscenario's onderling. Figuur 59 laat zien dat in de toekomst extreme neerslaghoeveelheden toe gaan nemen. Het resultaat van de transformatie wordt gebruikt als invoer van het FutureViewR model.

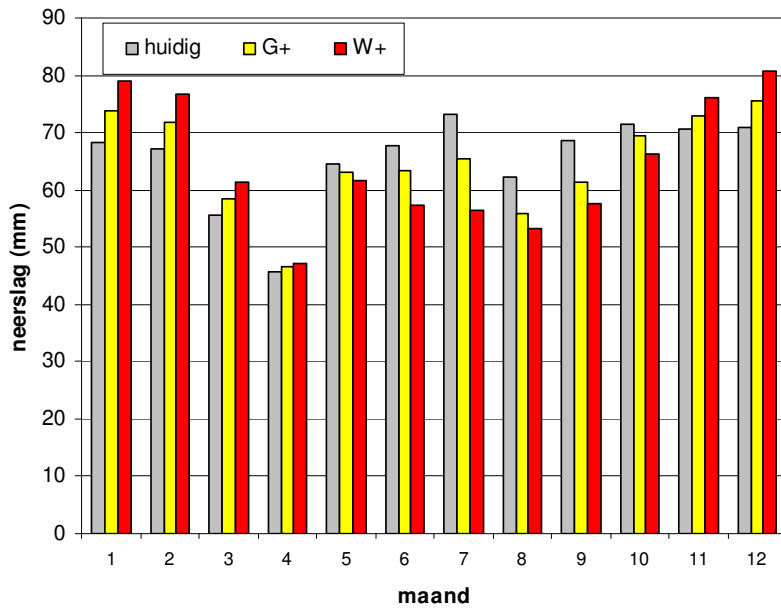




**Figuur 56: Maandelijkse toename van de potentiële verdamping volgens het G+ en het W+ scenario ten opzichte van het huidige klimaat.**



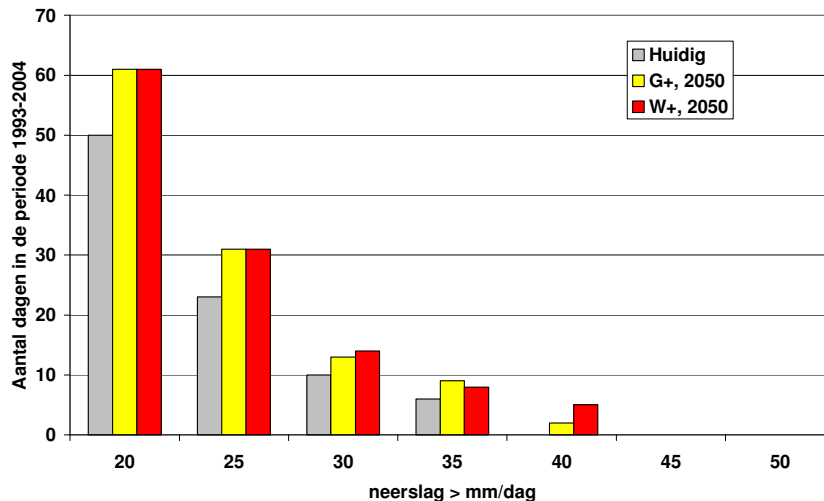
**Figuur 57: Neerslag, jaargemiddelden voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, en getransformeerde waarden voor het G+ en W+ scenario.**



**Figuur 58: Neerslag, maandgemiddelden voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, en getransformeerde waarden voor het G+ en W+ scenario.**







**Figuur 59: Overschrijding van dagelijkse neerslaghoeveelheden voor het huidige klimaat, het G+ en het W+ scenario.**

### 5.1.2 Rivierwaterstanden

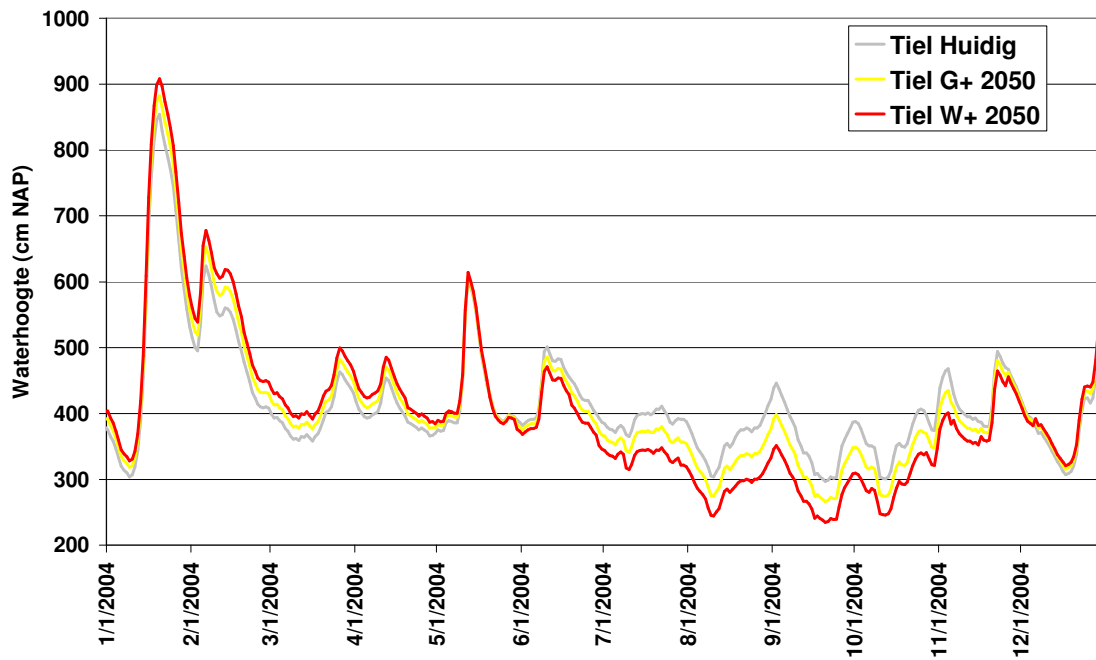
De veranderende neerslagpatronen hebben een grote invloed op de gemiddelde afvoeren van de rivieren. Op basis van de Rhineflow3 en Meuseflow2 modellen (Van Deursen, 2002) zijn de klimaatscenario's van het KNMI doorgerekend. Voor elk scenario is berekend wat de verandering is in gemiddelde afvoer per 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.

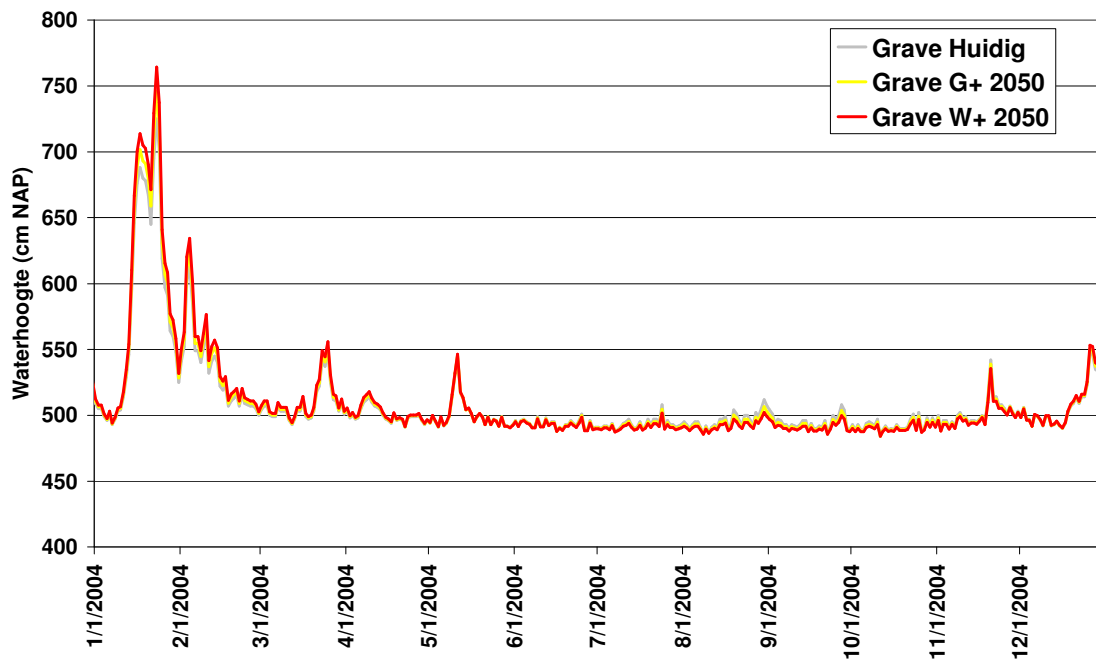
Deze methode is slechts een grove methode om de rivierreeksen om te rekenen. Er zijn nog geen standaardmethoden beschikbaar om een rivierreeks om te zetten. Deze methode gebruikt een aantal veronderstellingen. Er wordt vanuit gegaan dat de veranderde gemiddelde afvoeren in Lobith en Borgharen overeenkomen met de veranderde gemiddelde afvoeren in Tiel en Grave Beneden. Dit kan verschillen door de aanwezigheid van zijrivieren en kanalen.

Figuur 60 laat het effect zien van klimaatverandering zien op de waterstand van de Waal bij Tiel voor het jaar 2003. In de zomer en de herfst zijn de rivierstanden volgens het G+ en het W+ scenario lager dan in de huidige situatie. In de winter en het voorjaar zijn de waterstanden volgens beide toekomstscenario's juist iets hoger.

De waterstand van de Maas te Grave-Beneden wijzigt minder als gevolg van klimaatverandering (zie Figuur 61). Dit komt omdat de Maas gestuwd is. Alleen in pieksituaties zijn geringe veranderingen waarneembaar. Hierbij gelden dezelfde seizoensverschillen die geconstateerd zijn voor de Rijn.



**Figuur 60: Waterstanden bij Tiel voor de huidige situatie en verwachte waterstanden volgens het G+ en het W+ scenario.**



**Figuur 61: Waterstanden voor de Maas bij Grave-Beneden voor de huidige situatie en verwachte waterstanden volgens het G+ en het W+ scenario.**



### 5.1.3 Landgebruik

In 2007 heeft het Milieu en Natuur Planbureau (MNP) nieuwe landgebruik scenario's gepresenteerd voor het jaar 2040 (MNP, 2007). Het trendscenario 2040 gaat uit van autonome ontwikkelingen en is gebaseerd op:

- Demografische en economische ontwikkelingen zoals die verwacht worden door de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) en de planbureaus CPB, MNP en RPB (CPB/MNP/RPB, 2006).
- Ruimtelijke dynamiek, zoals die is afgeleid uit statistieken over wonen, werken, landbouw, natuur en infrastructuur.
- Interpretatie van vastgesteld beleid.

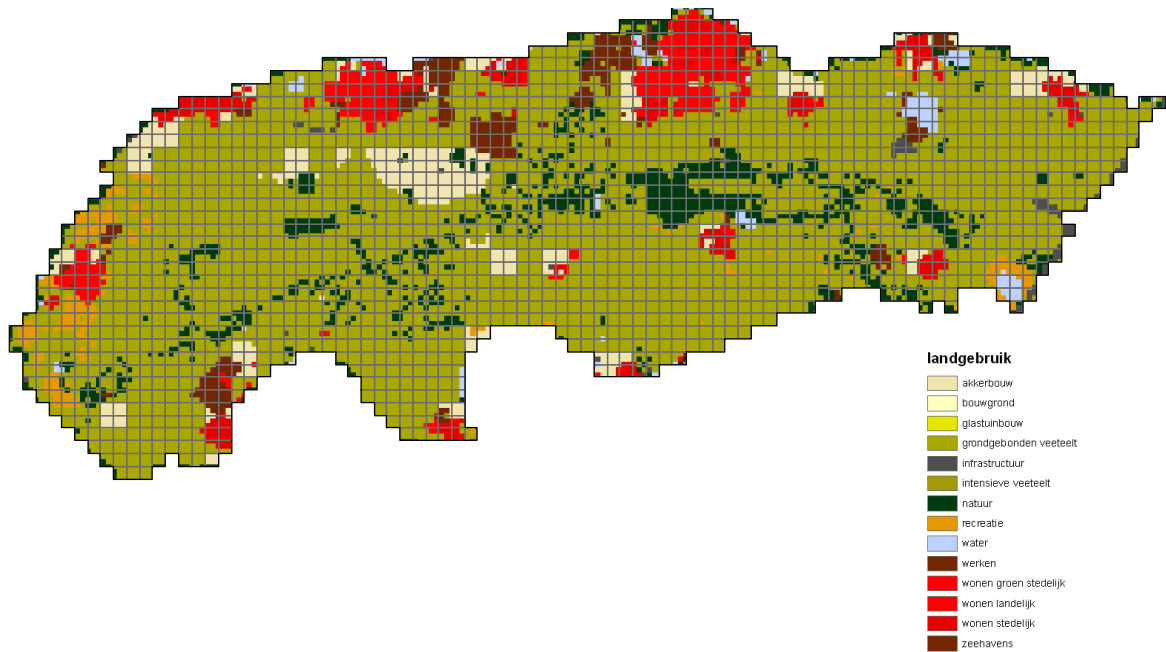
Het trendscenario 2040 is in het kader van het BSIK-programma "Aandacht voor veiligheid" (Aerts et al, 2008) aangepast voor het W en het G scenario. Figuur 62 en Figuur 63 laat het aangepaste trendscenario 2040 voor respectievelijk het G(+)-scenario en het W(+)-scenario zien.

Deze trendscenario's geven aan dat de oppervlakte aan natuur en wonen en werken toe gaat nemen ten koste van landbouwgebied. Volgens het voor het G-scenario aangepaste trendscenario wordt veel akkerbouw omgezet in grasland. De akkerbouw concentreert zich volgens dit scenario met name ten zuiden van Beneden-Leeuwen en Wamel. Volgens het voor het W-scenario aangepaste trendscenario blijft akkerbouw verspreid in het gebied aanwezig.

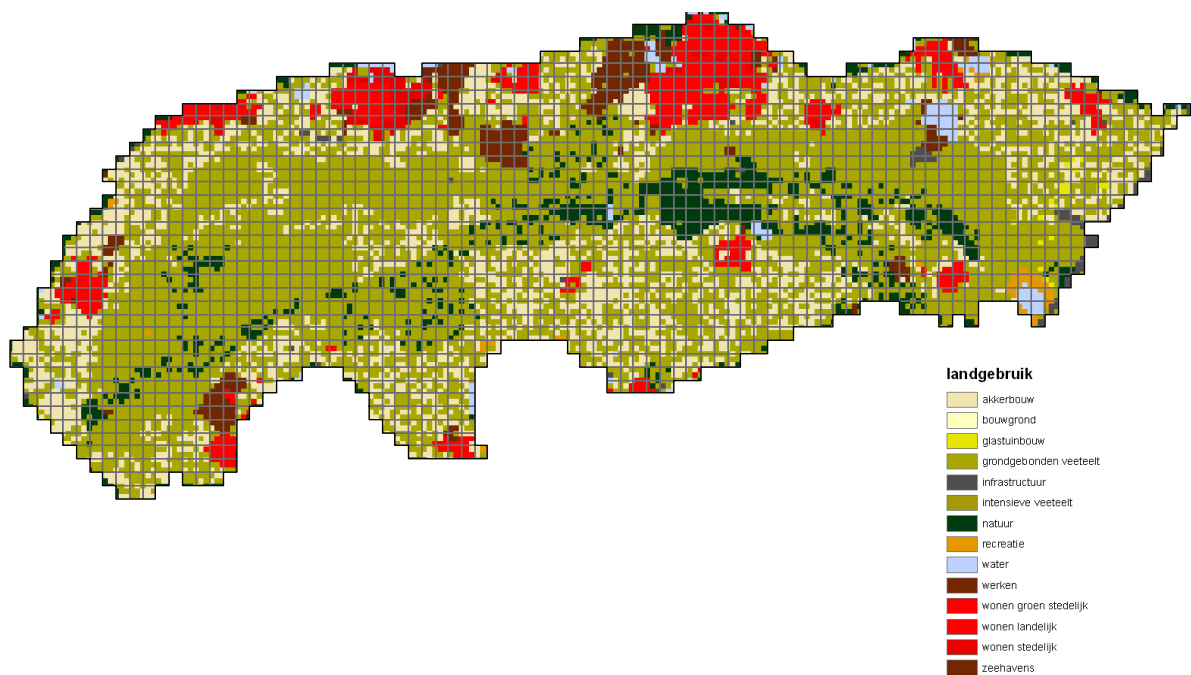
De landgebruiksklassen van Figuur 62 en Figuur 63 zijn omgezet in de landgebruiksklassen die in FutureViewR gehanteerd worden. Recreatie en natuur zijn omgezet in grasland tenzij er in de huidige situatie bos staat. In dat geval is aangenomen dat het bos behouden blijft. Deze indeling is gebaseerd op de natuurdoelen van de provincie Gelderland. Per rastercel is het overheersende landgebruik toegekend.

Figuur 64 geeft het resultaat van de omzetting: het landgebruik voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario. De polderpeilen zijn niet aangepast aan het veranderde landgebruik. Wel is aangenomen dat nieuw stedelijk gebied goed gedraineerd wordt met buisdrainage om de 20 meter.

In §5.1.1 is reeds vermeld dat voor de transformatie van de potentiële verdamping een procentuele verandering per maand is aangenomen (zie Figuur 56). Daar nu tevens het toekomstige landgebruik is aangepast kan de potentiële verdamping bepaald worden. Deze neemt toe van gemiddeld 520 mm in de huidige situatie tot respectievelijk 557 mm (G+ scenario) en 593 mm (W+ scenario) rond 2050. Figuur 65 geeft de maandelijkse potentiële verdamping weer voor zowel de huidige situatie als de toekomstscenario's. Deze figuur laat zien dat in bepaalde maanden de potentiële verdamping volgens het G+ scenario hoger is dan volgens het W+ scenario of lager dan in de huidige situatie. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in landgebruik.



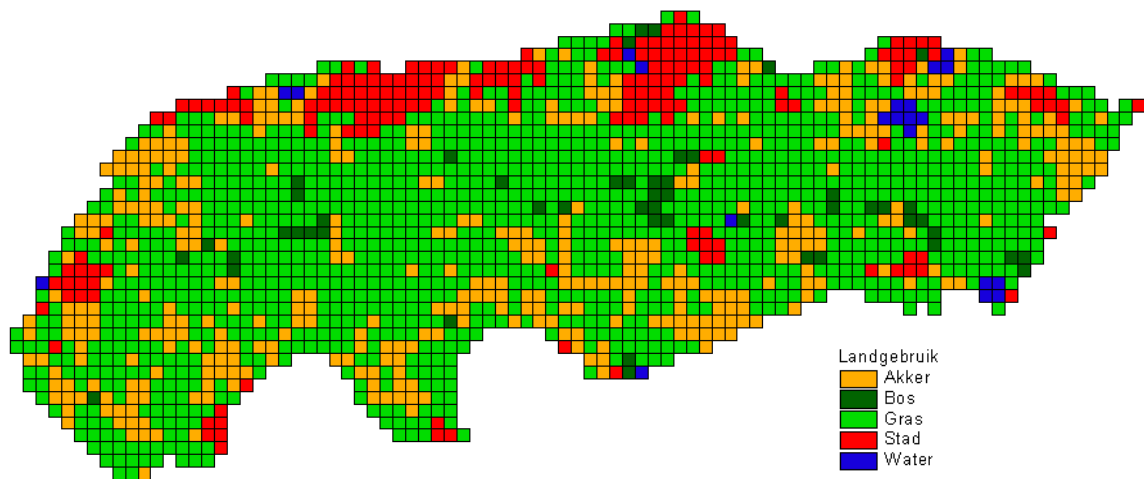
**Figuur 62: Landgebruik volgens het voor het G-scenario aangepaste trendscenario 2040.**



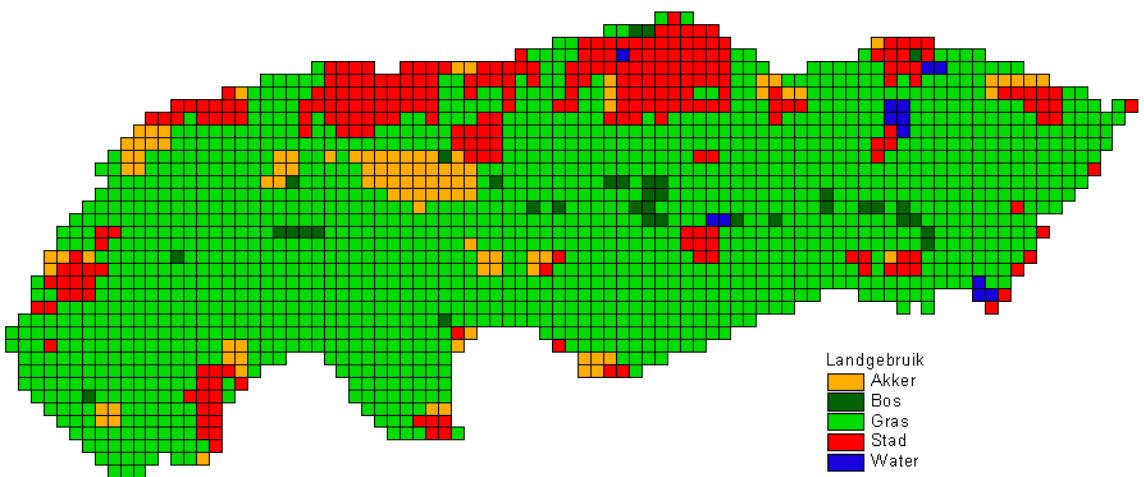
**Figuur 63: Landgebruik volgens het voor het W-scenario aangepaste trendscenario 2040.**



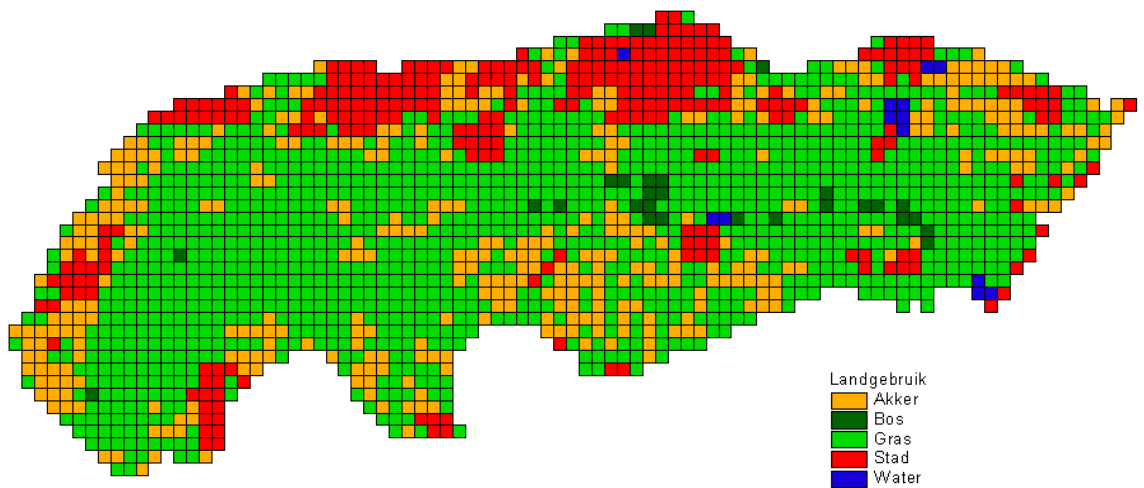
a)



b)

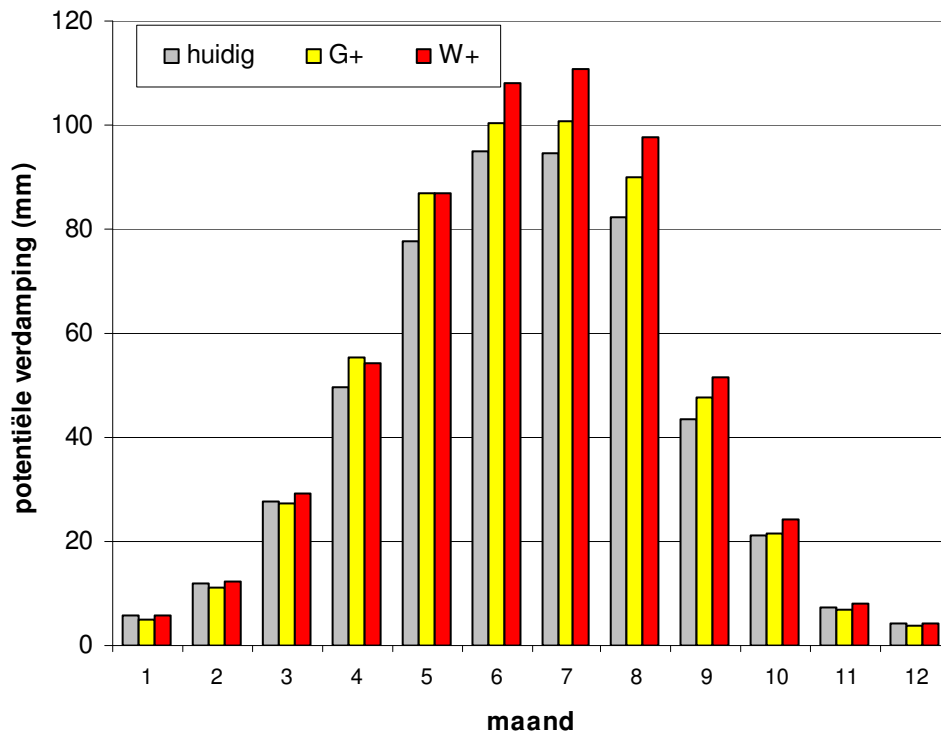


c)



**Figuur 64: Landgebruik (modelinvoer) voor het huidige scenario (a), het G+ scenario (b) en het W+ scenario (c).**





**Figuur 65: Potentiële verdamping, gemiddelde per maand voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario, rekening houdend met veranderend landgebruik.**

## 5.2 Resultaten

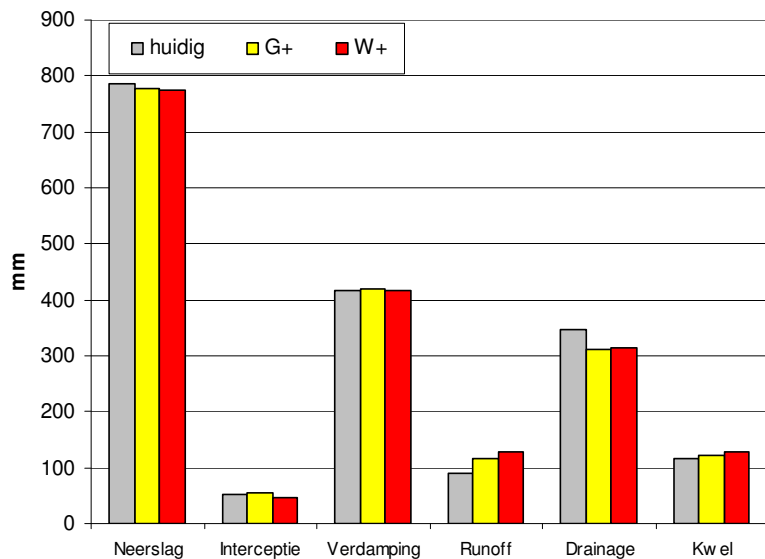
### 5.2.1 Algemeen

De klimaat- en landgebruiksveranderingen volgens het G+ en het W+ scenario zoals in de vorige paragraaf besproken zijn als invoer voor FutureViewR gebruikt. In deze paragraaf wordt het effect op de hydrologische processen besproken ten opzichte van de huidige situatie. Er is gekeken naar het getransformeerde 10 jarig gemiddelde (1995-2004) en naar een getransformeerde droge zomer (2003) en natte winter (1995). Deze worden benoemd als langjarig gemiddeld rond 2050, een droge zomer rond 2050 en een natte winter rond 2050.

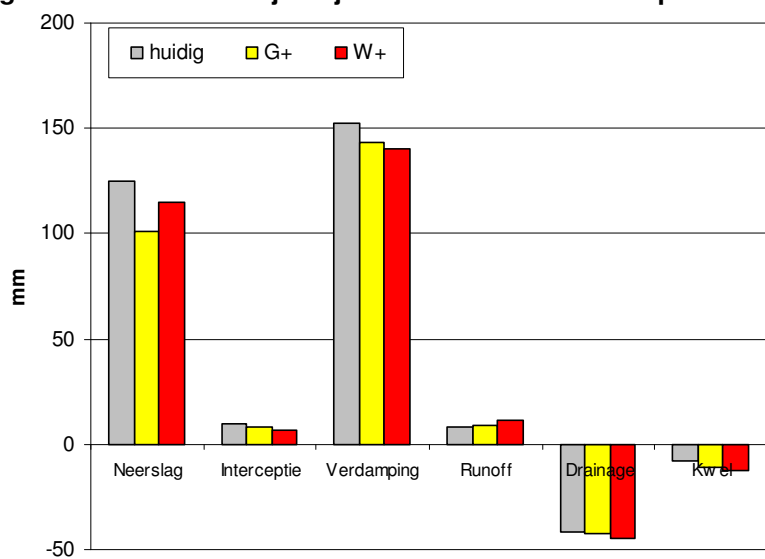
In Figuur 66 is de gemiddelde jaarlijkse waterbalans weergegeven voor de 10-jarige periode voor zowel de huidige situatie als de toekomstscenario's. De verschillen zijn niet extreem groot. In de vorige paragraaf is reeds vermeld dat de neerslag volgens het W+ scenario gemiddeld 15 mm lager zal zijn rond 2050. Ondanks de hogere potentiële verdamping blijft de actuele verdamping nagenoeg gelijk. Door een toename van extreme buien neemt de runoff toe. De jaarlijkse kwel neemt licht toe terwijl de drainage afneemt.

Figuur 67 en Figuur 68 laten de huidige en toekomstige berekende waterbalans zien voor een droge zomer en een natte winter. De zomer wordt droger en de winter wordt natter en dit heeft duidelijk effect op de overige waterbalans termen.

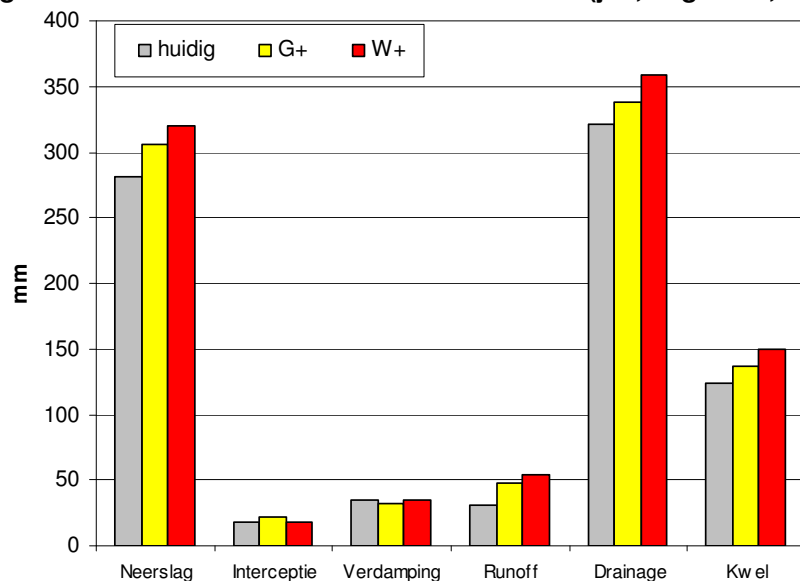




**Figuur 66: Gemiddelde jaarlijkse waterbalans over de periode 1995-2004.**



**Figuur 67: Waterbalans voor de zomer van 2003 (juli, augustus, september).**



**Figuur 68: Waterbalans voor de winter van 1995 (januari, februari, maart).**

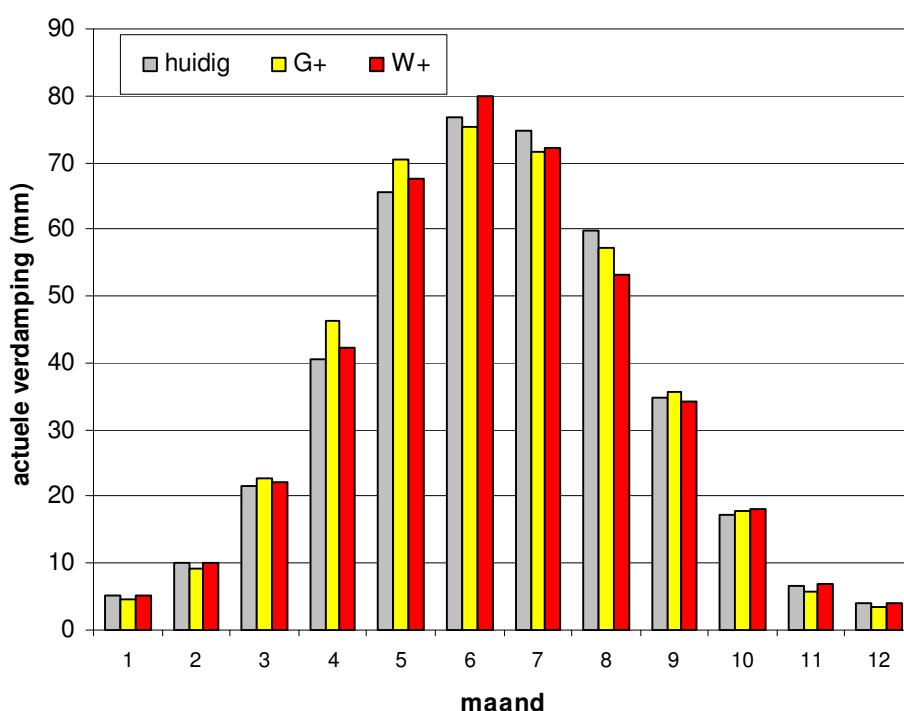


## 5.2.2 Verdamping

In de vorige paragraaf hebben we geconstateerd dat ondanks de toename van potentiële verdamping de gemiddelde jaarlijkse actuele verdamping nagenoeg gelijk blijft volgens de toekomstscenario's. Figuur 69 laat de gemiddelde actuele verdamping per maand zien. Vochttekort in de zomermaanden is de oorzaak van het achterblijven van de actuele verdamping. In werkelijkheid kan dit vochttekort opgeheven worden door beregening. Dit is niet opgenomen in FutureViewR.

Figuur 70, Figuur 71 en Figuur 72 geven de ruimtelijke verdeling van de gemiddeld jaarlijkse som van actuele verdamping weer voor respectievelijk de huidige situatie, het G+ scenario en het W+ scenario. In de kleigebieden neemt de verdamping iets af, terwijl in de zandgebieden de verdamping juist iets toeneemt. In nieuw stedelijk gebied neemt de verdamping eveneens af.

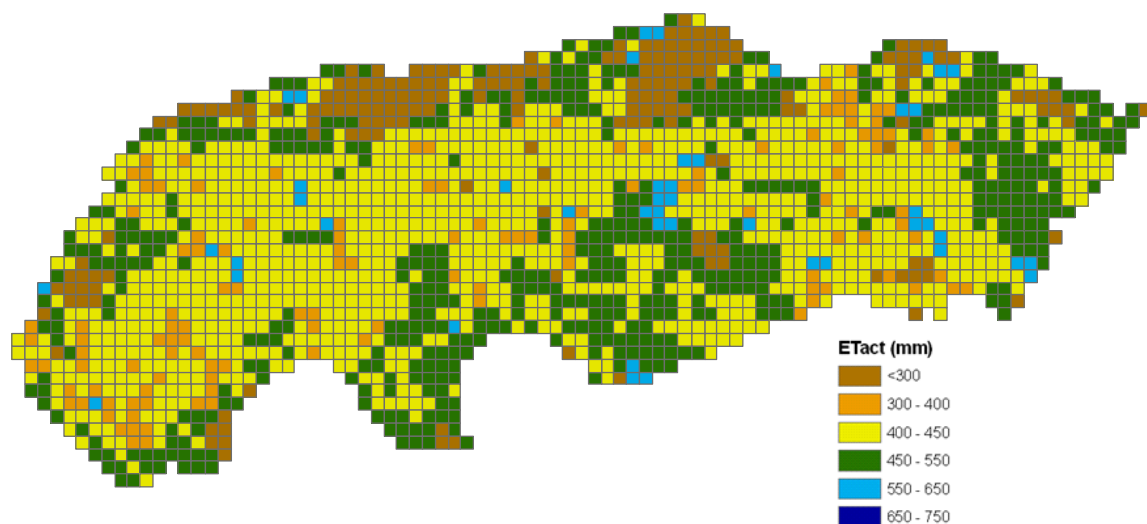
Figuur 73, Figuur 74 en Figuur 75 geven het verdampingstekort weer gedurende de zomer van 2003 en een droge zomer rond 2050 volgens het G+ en het W+ scenario. Het verdampingstekort is gedefinieerd als het verschil tussen potentiële en actuele verdamping. Volgens de toekomstscenario's neemt het verdampingstekort flink toe. Volgens het G+ scenario loopt het verdampingstekort op de kleigronden op tot 100 à 200 mm. Het verdampingstekort op de zandgronden blijft beperkt tot 50 à 100 mm. Volgens het W+ scenario neemt, ook op de zandgronden, het verdampingstekort verder toe. In de toekomst zal in de zomer meer wateraanvoer nodig zijn om gewasopbrengsten te garanderen.



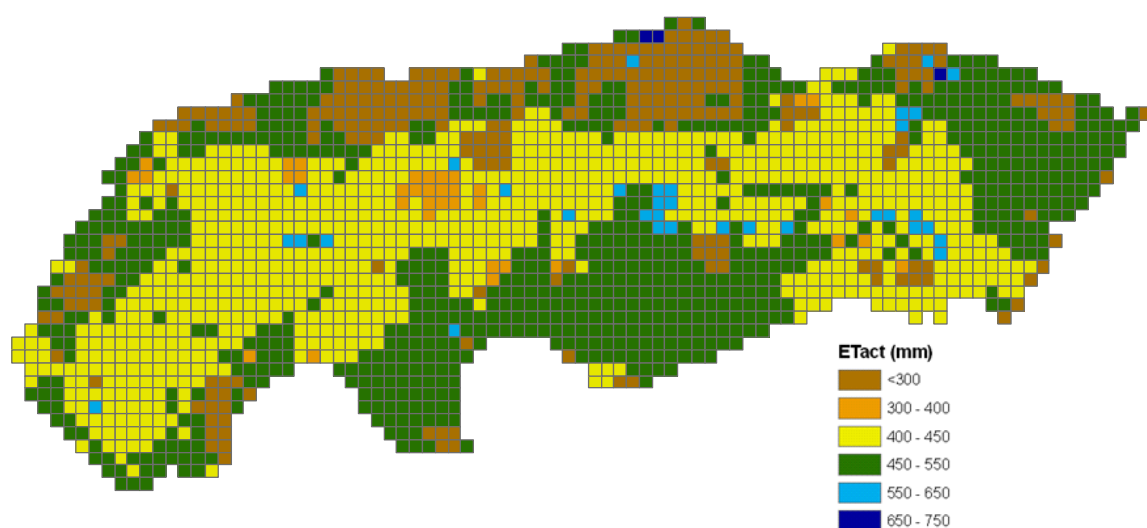
**Figuur 69: Actuele verdamping, gemiddelde per maand voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario.**



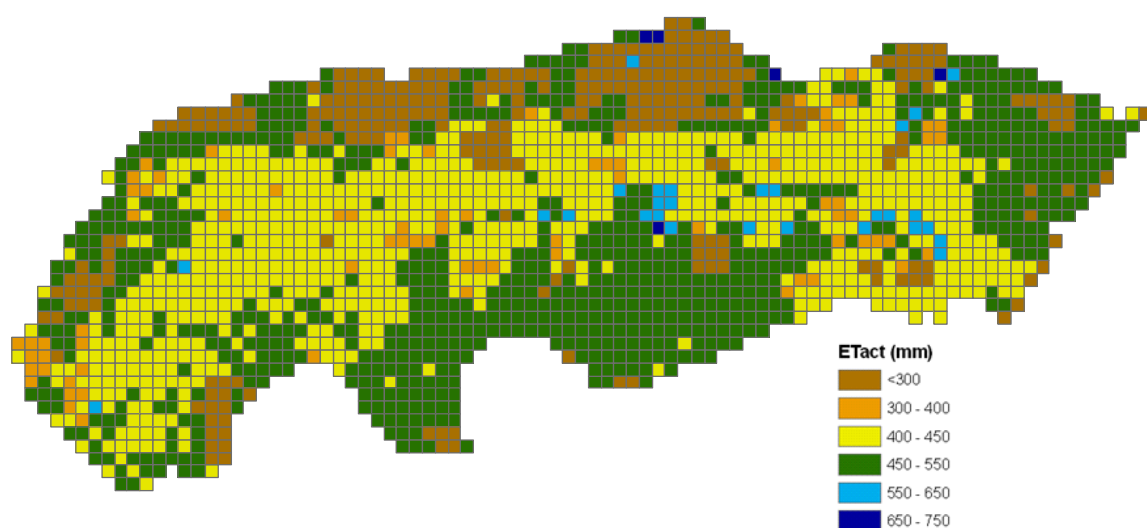




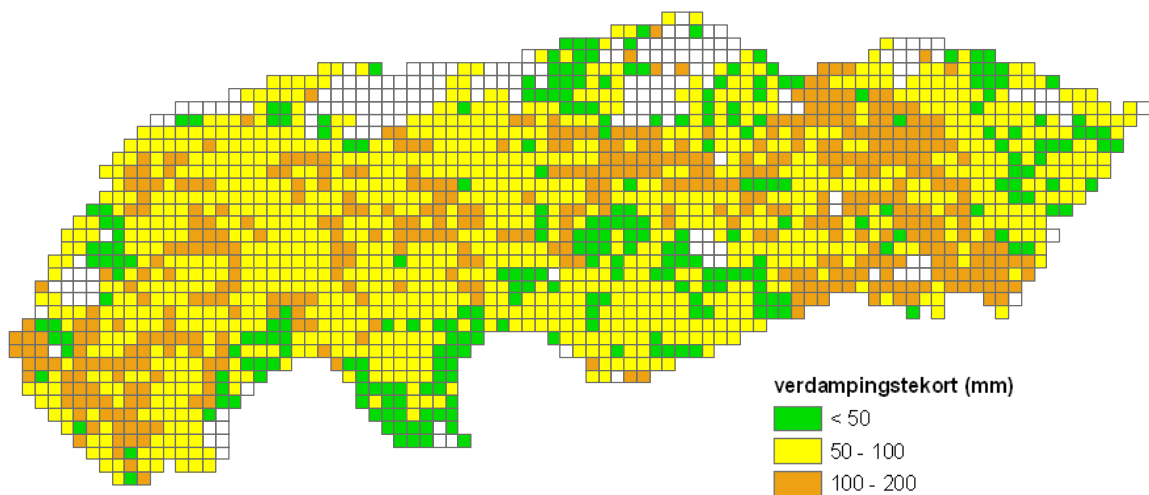
**Figuur 70: Actuele evapotranspiratie, gemiddelde jaarlijkse som voor de huidige situatie.**



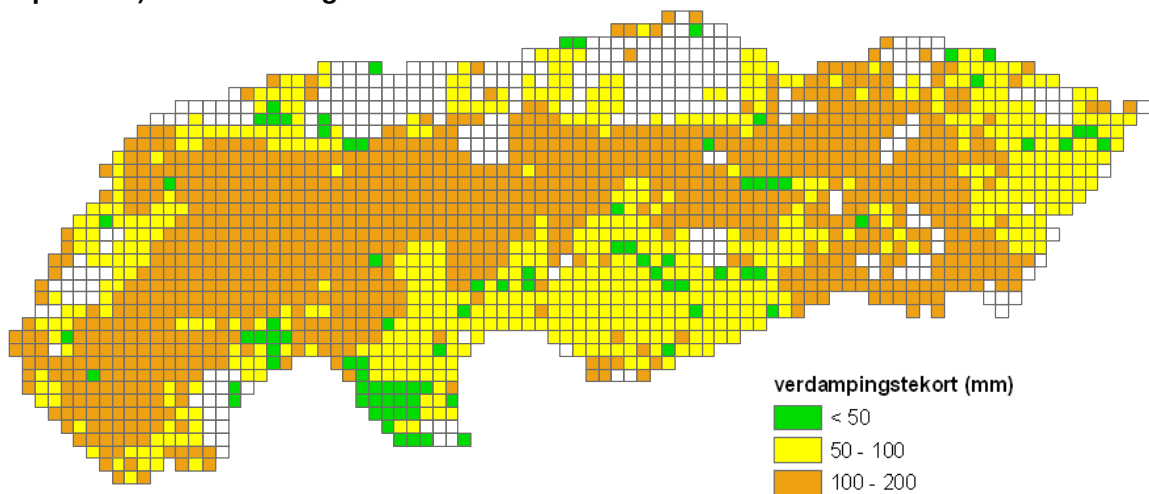
**Figuur 71: Actuele evapotranspiratie, gemiddelde jaarlijkse som rond 2050 volgens het G+ scenario.**



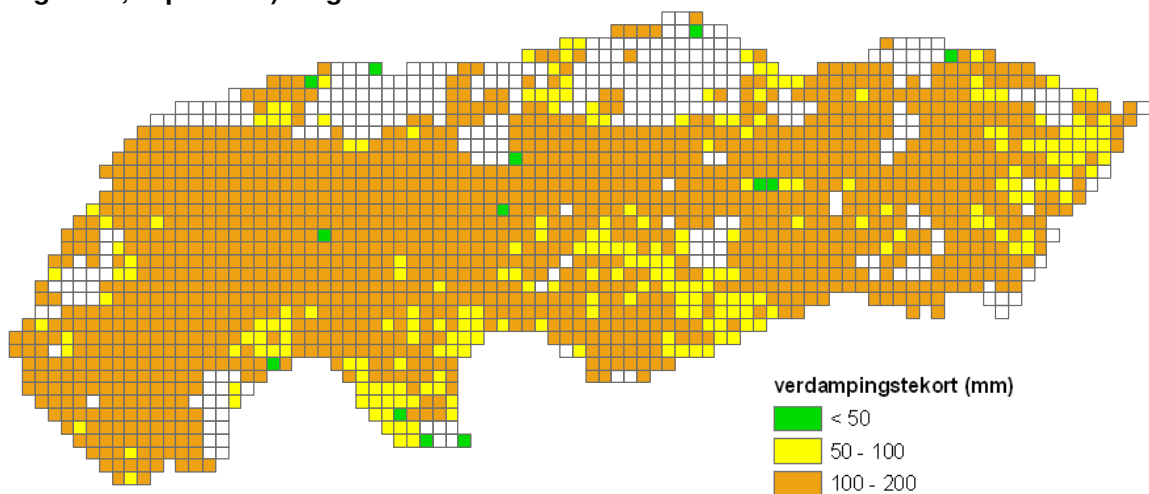
**Figuur 72: Actuele evapotranspiratie, gemiddelde jaarlijkse som rond 2050 volgens het W+ scenario.**



**Figuur 73: Totale verdampingstekort gedurende de zomer van 2003 (juli, augustus, september) voor de huidige situatie.**



**Figuur 74: Totale verdampingstekort gedurende een droge zomer rond 2050 (juli, augustus, september) volgens het G+ scenario.**



**Figuur 75: Totale verdampingstekort gedurende een droge zomer rond 2050 (juli, augustus, september) volgens het W+ scenario.**



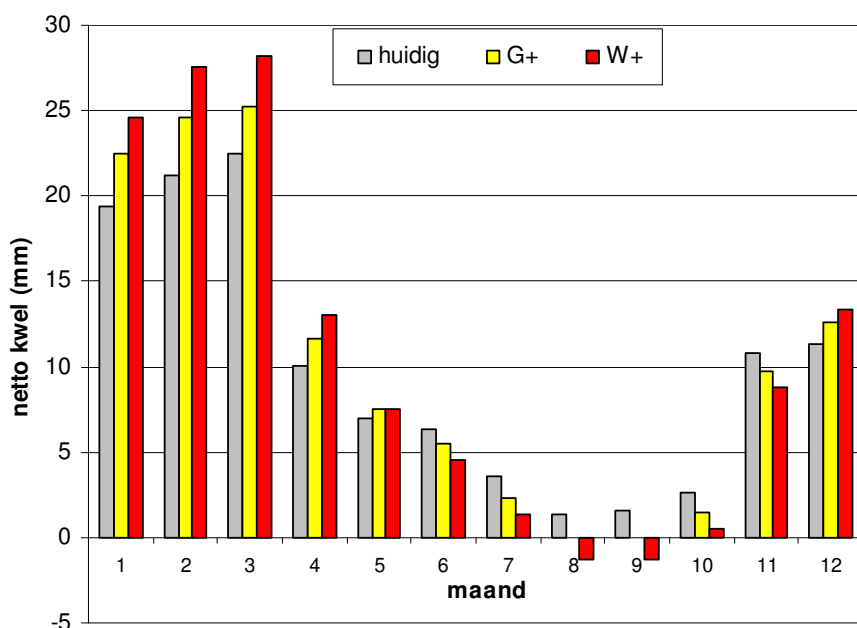
### 5.2.3 Kwel en wegzijging

In § 5.2.1 is reeds geconstateerd dat de gemiddelde jaarlijkse netto kwel licht toeneemt van 118 mm in de huidige situatie tot 127 mm volgens het W+ scenario. Figuur 76 laat de gemiddelde netto kwel of wegzijging per maand zien. In de winter en het voorjaar neemt de kwel onder invloed van de stijgende rivierwaterstanden toe. In de zomer zijn de rivierwaterstanden lager en neemt de kwel af. In augustus en september vindt er zelfs een omslag plaats van netto kwel in de huidige situatie tot netto wegzijging voor het W+ scenario. In deze maanden komt de balans voor kwel en wegzijging volgens het G+ scenario precies op nul uit.

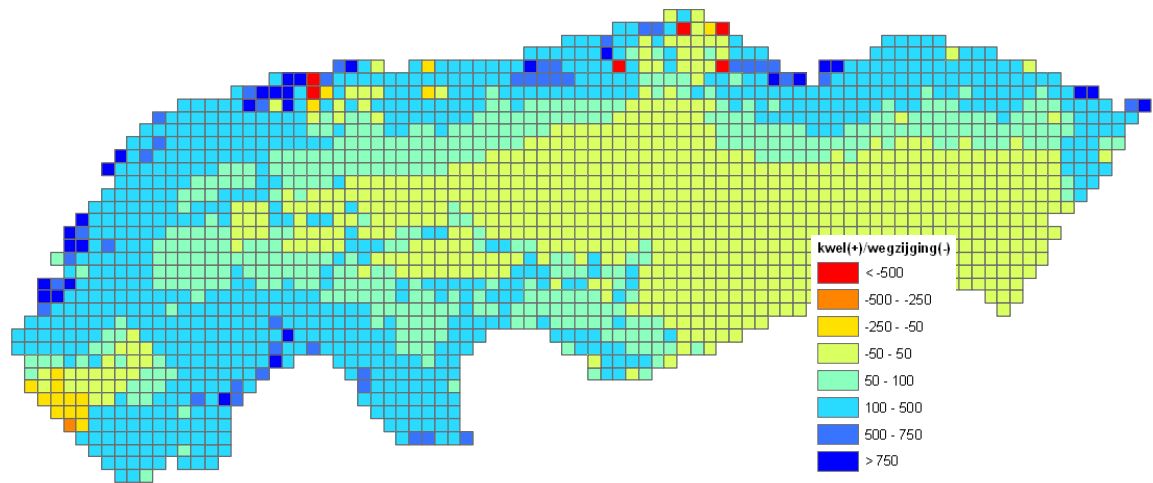
Figuur 77 geeft de ruimtelijke verdeling van de gemiddeld jaarlijkse kwel of wegzijging voor de huidige situatie weer. Figuur 78 en Figuur 79 geven respectievelijk de verandering die volgens het G+ scenario en het W+ scenario voor 2050 berekend is. Er treedt in de huidige situatie overwegend kwel op. Volgens de toekomstscenario's gaat deze kwel toenemen in een strook langs de rivieren. Deze strook is het breedst volgens het W+ scenario. De toename is het grootst ter hoogte van zandbanen.

Figuur 80 geeft de ruimtelijke verdeling van de extreme kwel in de winter van 1995 weer. Figuur 81 en Figuur 82 geven de verandering die respectievelijk volgens het G+ scenario en het W+ scenario voor zo'n extreme situatie rond 2050 berekend is. De toename van de toch al extreme kwel is aanzienlijk. Met name volgens het W+ scenario leiden hogere waterstanden tot een toename van de kwel in een brede strook langs de rivieren van meer dan 25 mm.

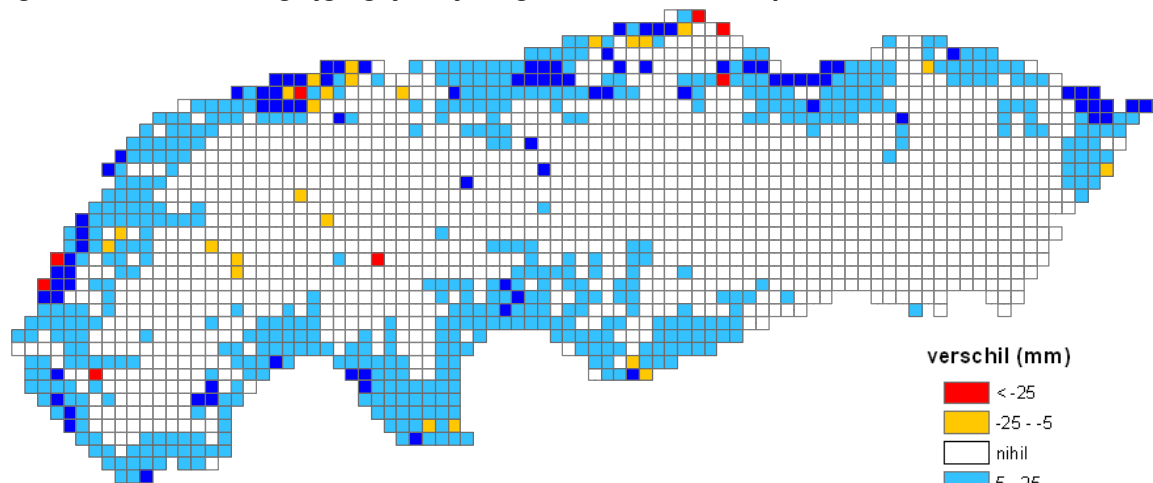
Figuur 83 geeft de ruimtelijke verdeling van de berekende kwel en wegzijging in de droge zomer van 2003. De gestuwde Maas veroorzaakt kwel in het zuidwestelijke deel van de polder. Langs de Waal wordt echter wegzijging berekend. Volgens Figuur 84 n Figuur 85 verandert er langs de Maas niet veel in een droge zomer rond 2050. Echter, langs de Waal neemt de wegzijging verder toe. Ter hoogte van zandbanen treedt volgens het W+ scenario in de zomermaanden een extra wegzijging op van meer dan 25 mm.



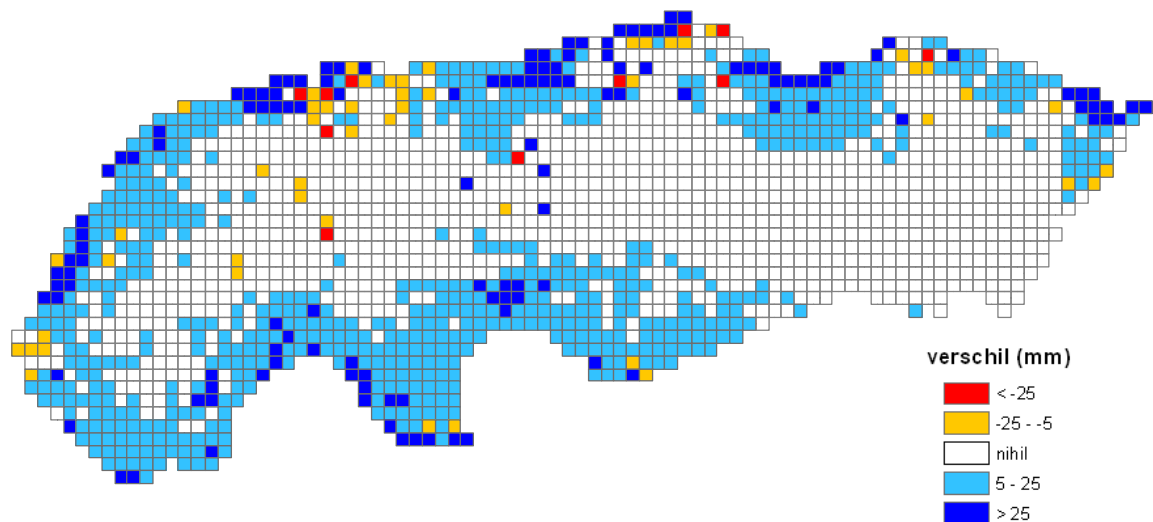
**Figuur 76: Kwel en Wegzijging, gemiddelde per maand voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario.**



**Figuur 77: Kwel en Wegzijing, jaarlijkse gemiddelde over de periode 1995-2004.**

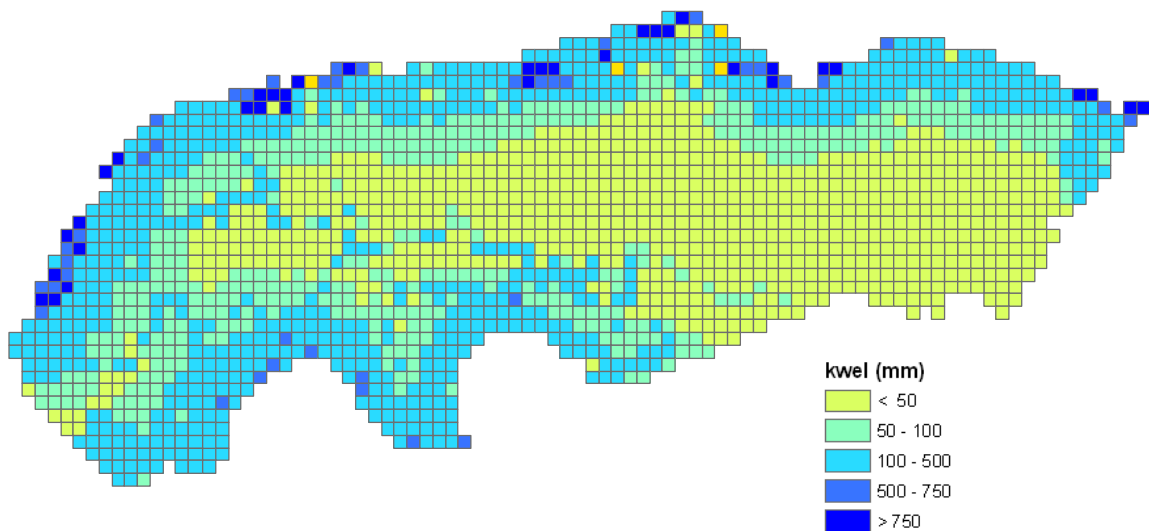


**Figuur 78: Verschil in jaarlijks gemiddelde kwel en wegzijing tussen het scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren in de toekomst een toename van kwel of een afname van wegzijing).**

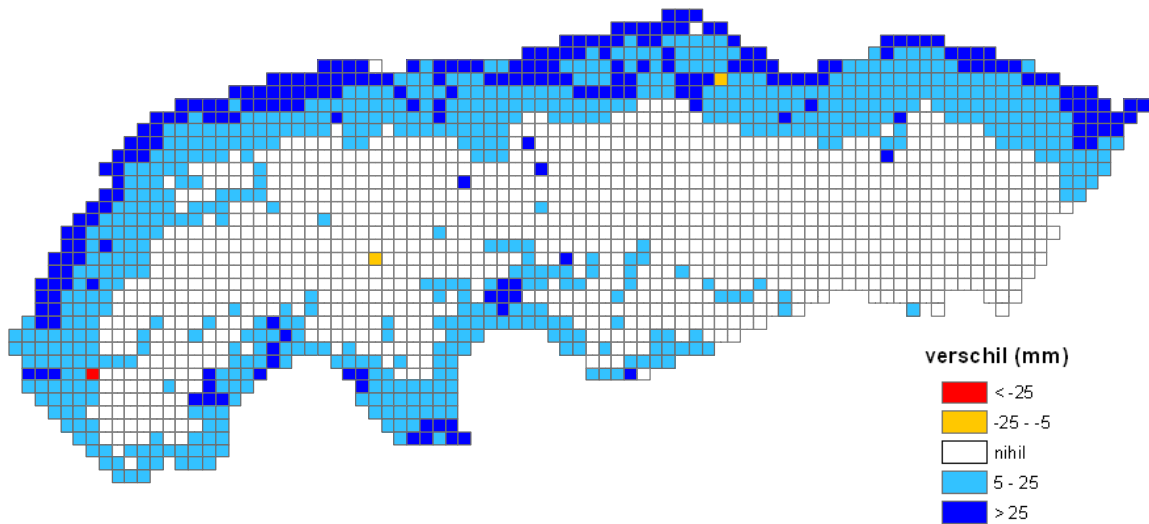


**Figuur 79: Verschil in jaarlijks gemiddelde kwel en wegzijing tussen het scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren in de toekomst een toename van kwel of een afname van wegzijing)**

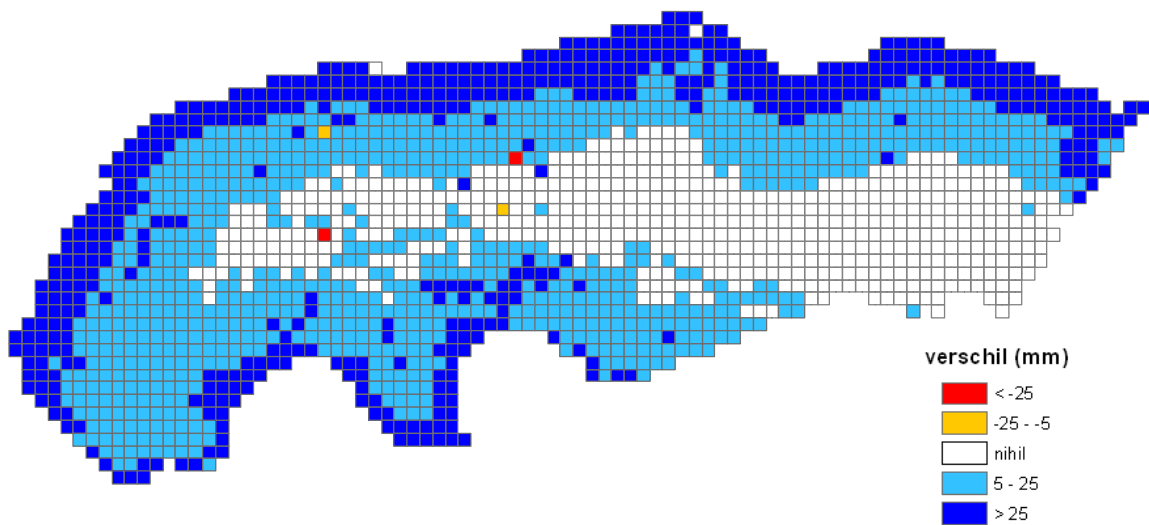




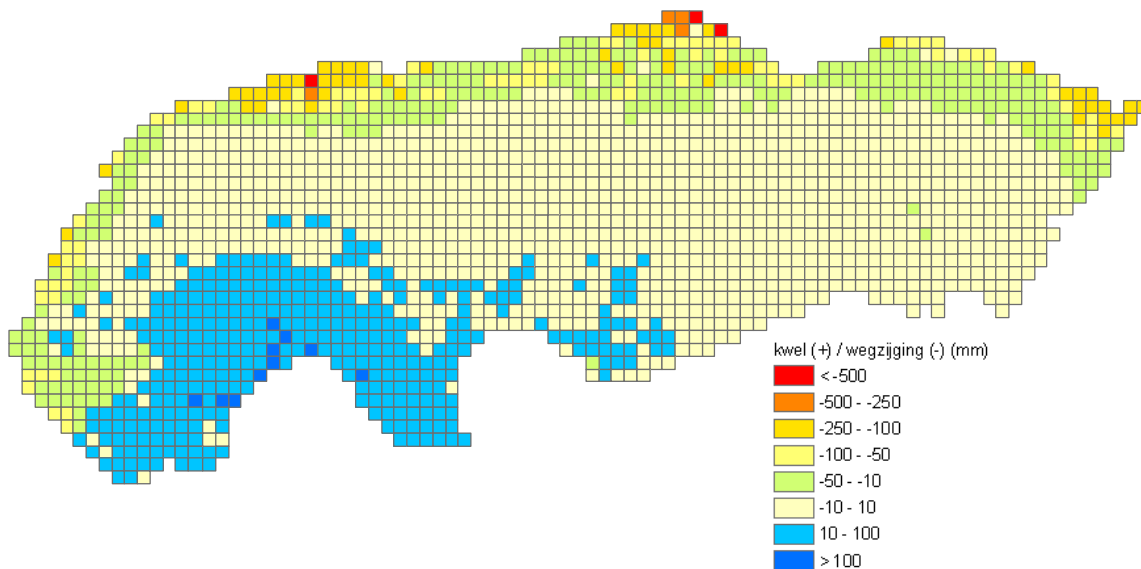
Figuur 80: Kwel in de winter van 1995 (januari, februari, maart) voor de huidige situatie.



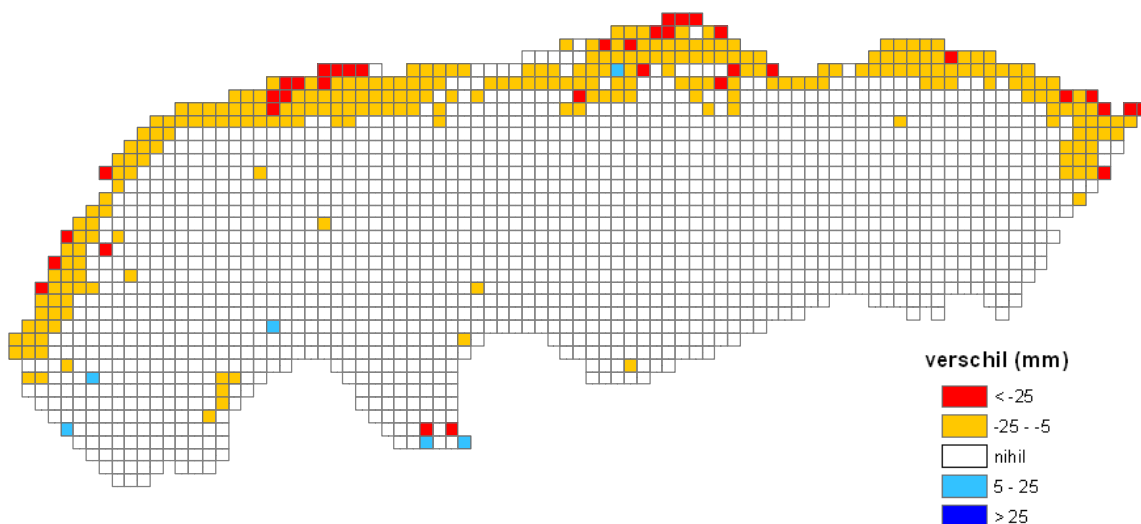
Figuur 81: Verschil in kwel in een natte winter tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren meer kwel rond 2050).



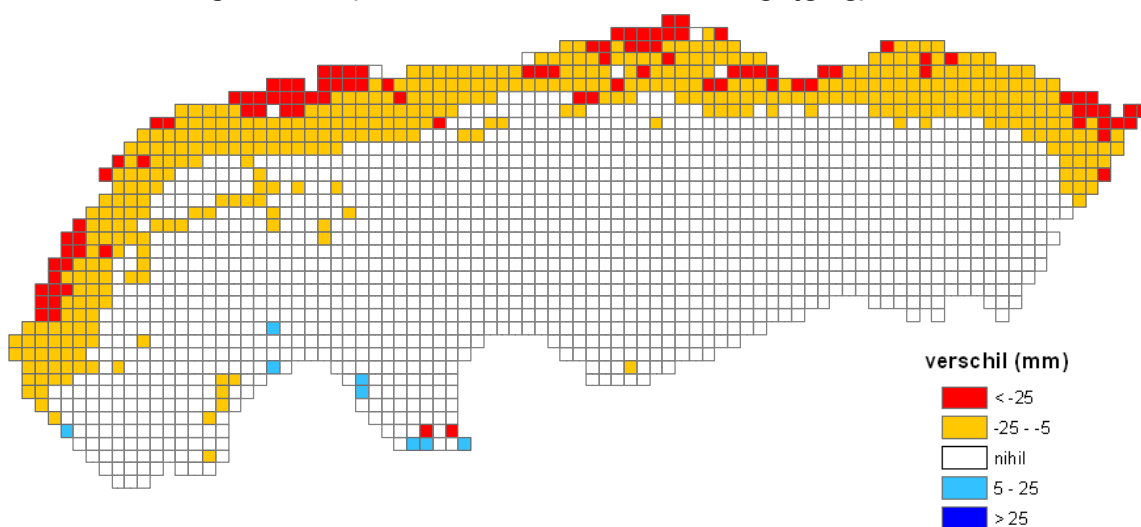
Figuur 82: Verschil in kwel in een natte winter tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren meer kwel rond 2050).



**Figuur 83: Kwel en wegzijging in de zomer van 2003 (juli, augustus, september) voor de huidige situatie.**



**Figuur 84: Verschil in kwel en wegzijging in een droge zomer tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (rode kleuren indiceren meer wegzijging).**



**Figuur 85: Verschil in kwel en wegzijging in een droge zomer tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (rode kleuren indiceren meer wegzijging).**

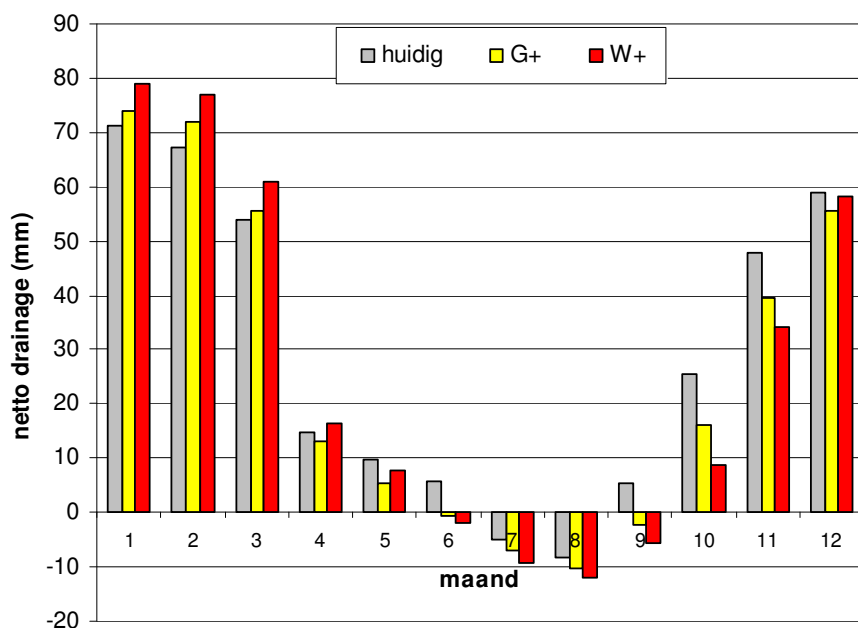


## 5.2.4 Drainage en infiltratie

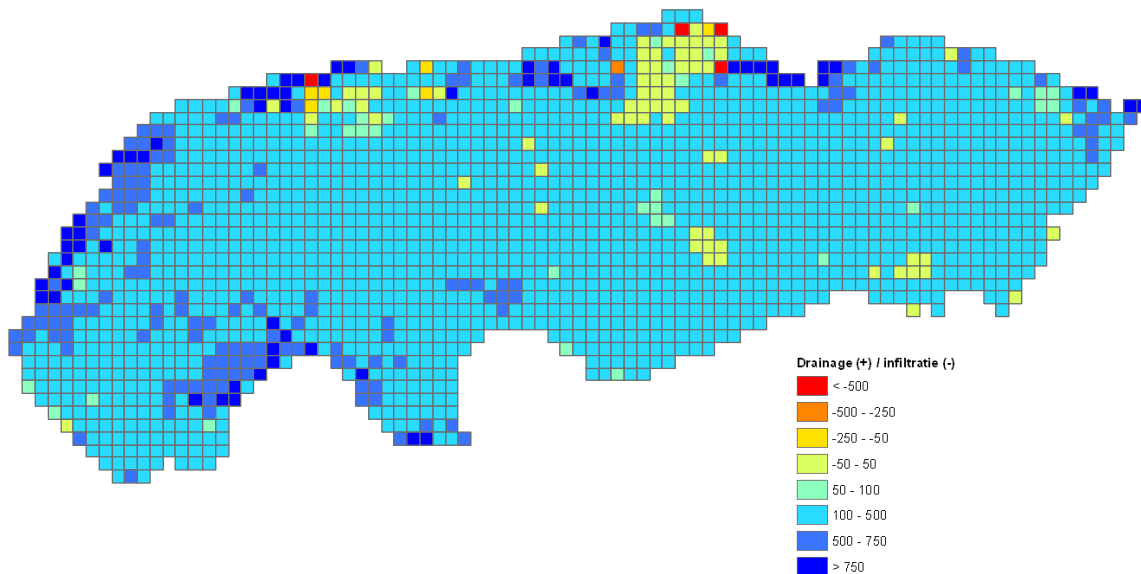
In § 5.2.1 is geconstateerd dat de langjarig gemiddelde jaarlijkse netto drainage flink afneemt van ca. 350 mm in de huidige situatie tot ca. 310 mm voor een gemiddeld jaar rond 2050. Figuur 86 laat de gemiddelde netto drainage of infiltratie per maand zien. In het voorjaar neemt onder invloed van een toename van de neerslag en de kwel de drainage toe. In de zomer neemt onder invloed van een afname van de neerslag en meer wegzijging de infiltratie toe. In juni en september treedt nu nog netto drainage op. In de toekomst zal dit omslaan naar netto infiltratie. Hoewel in 2050 de gemiddelde neerslag in november hoger is dan in de huidige situatie treedt er in deze maand in 2050 toch minder drainage op. Kennelijk wordt het neerslagoverschot nog gebruikt om het grondwater aan te vullen.

Figuur 87 geeft de ruimtelijke verdeling van de gemiddeld jaarlijkse drainage of infiltratie weer voor de huidige situatie. Figuur 88 en Figuur 89 geven respectievelijk de verandering die volgens het G+ scenario en het W+ scenario voor 2050 berekend is. Er treedt in de huidige situatie overwegend drainage op. Volgens de toekomstscenario's gaat deze drainage vooral afnemen. Deze afname is het sterkst voor het W+ scenario. Er zijn echter een aantal locaties waar de drainage in de toekomst niet af zal nemen. Voor stedelijk gebied verandert er niet veel. Hier verloopt de afvoer van overtollig regenwater met name via de riolering. Ter hoogte van zandbanen direct langs de Waal neemt onder invloed van een toename van de kwel de drainage toe. Ook neemt de drainage toe daar waar grasland in de toekomst vervangen wordt door bouwland.

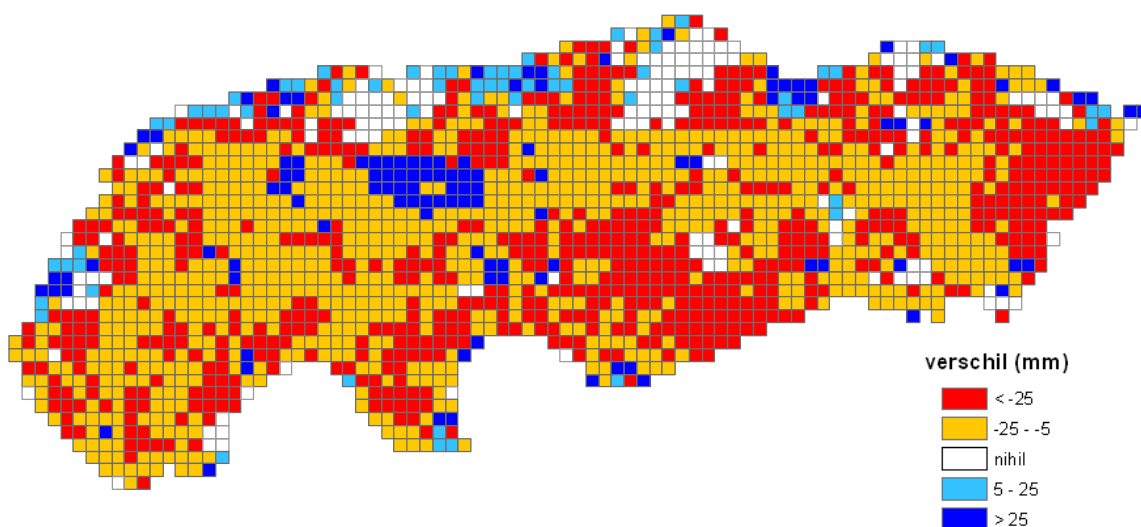
Figuur 90 geeft de ruimtelijke verdeling van de infiltratie weer in de droge zomer van 2003. Figuur 91 en Figuur 92 geven de infiltratieverandering die respectievelijk volgens het G+ scenario en het W+ scenario voor zo'n droge zomer rond 2050 berekend is. De huidige infiltratie is het laagst in de kleigebieden. De infiltratie neemt rond 2050 met name toe langs de Waal onder invloed van de toename van de wegzijging. Voor nieuw stedelijk gebied neemt de infiltratie af. In de kleigebieden neemt de infiltratie niet toe.



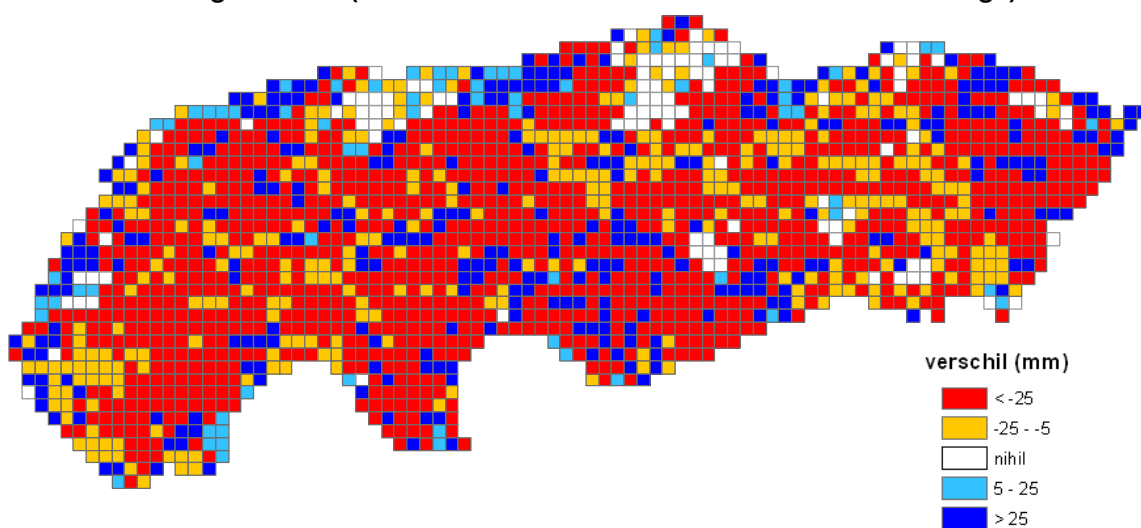
**Figuur 86: Drainage en Infiltratie, gemiddelde per maand voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario.**



Figuur 87: Drainage en infiltratie, jaarlijkse gemiddelde over de periode 1995-2004.



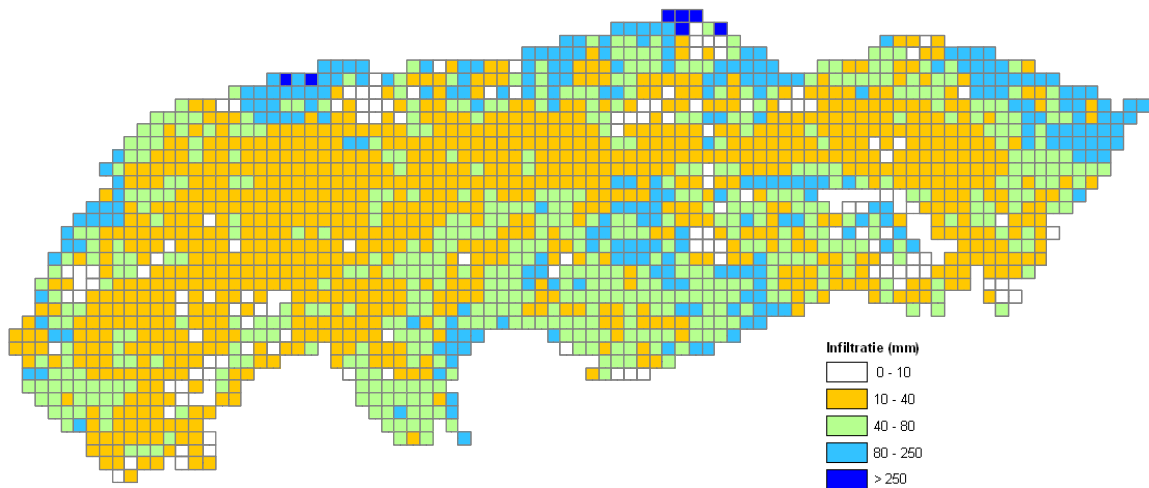
Figuur 88: Verschil in jaarlijks gemiddelde drainage en infiltratie tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (rode kleuren indiceren een afname van de drainage).



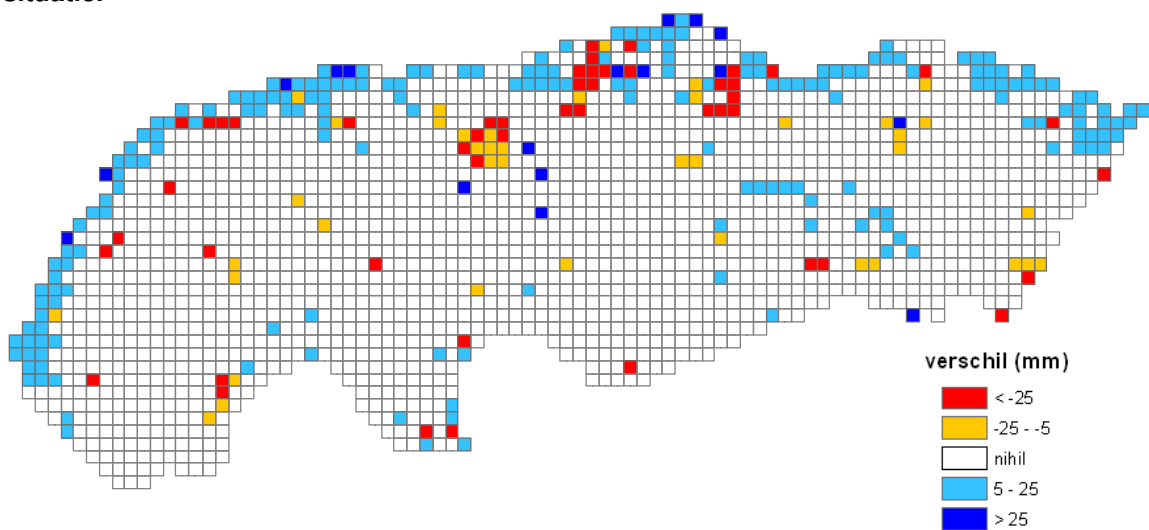
Figuur 89: Verschil in jaarlijks gemiddelde drainage en infiltratie tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (rode kleuren indiceren een afname van de drainage).



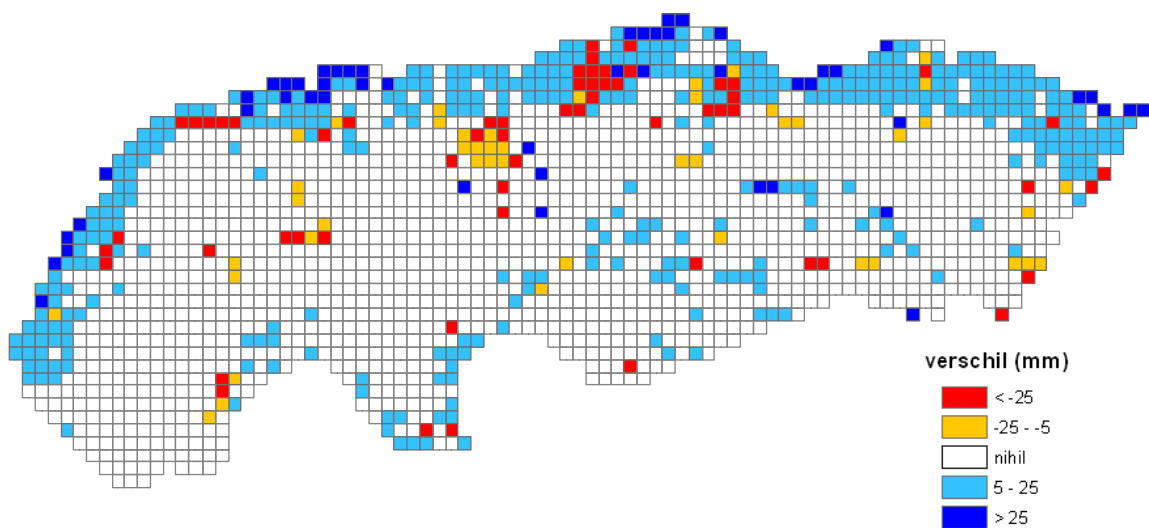




**Figuur 90: Infiltratie in de zomer van 2003 (juli, augustus, september) voor de huidige situatie.**



**Figuur 91: Verschil in infiltratie in een droge zomer tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren een toename van de infiltratie).**

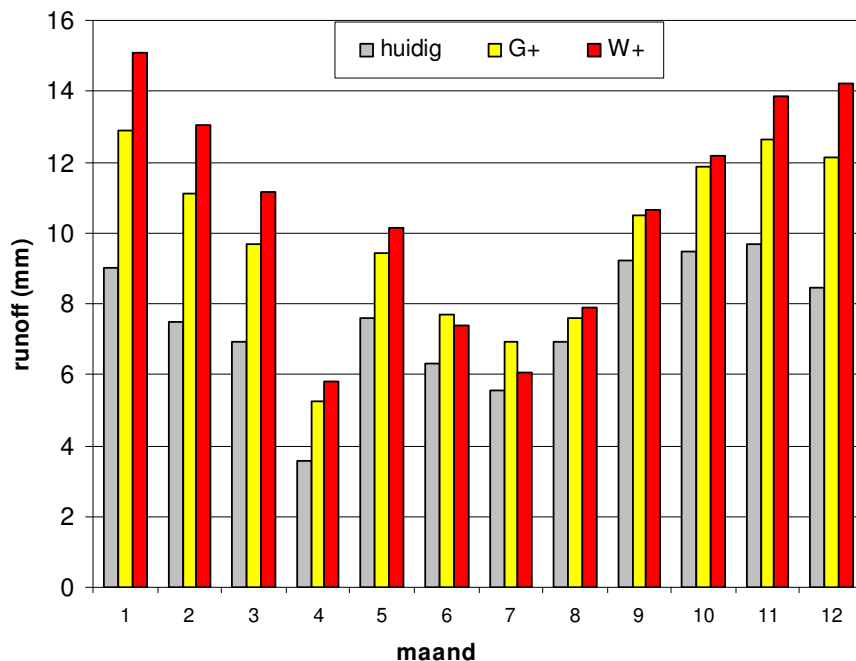


**Figuur 92: Verschil in infiltratie in een droge zomer tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (blauwe kleuren indiceren een toename van de infiltratie).**

### 5.2.5 Runoff

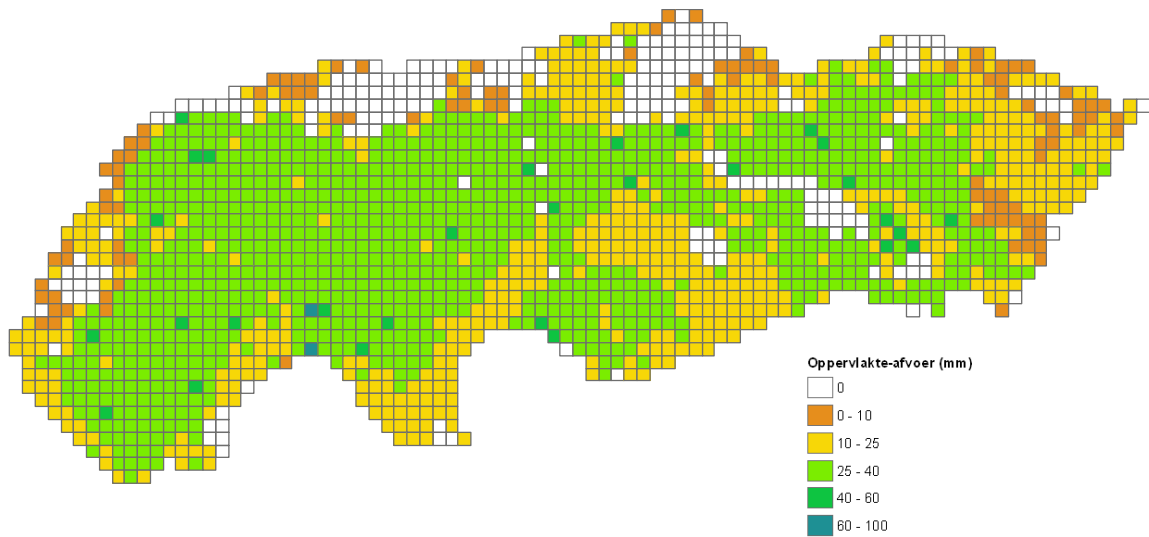
In § 5.2.1 is geconstateerd dat de gemiddelde jaarlijkse runoff onder invloed van intensere buien en meer verstedelijking toeneemt van 90 mm in de huidige situatie tot respectievelijk 118 mm (G+) en 127 mm (W+) rond 2050. Figuur 93 laat de gemiddelde runoff per maand zien. In 2050 is de runoff het hele jaar door hoger dan voor de huidige situatie. Het meeste van deze oppervlakte-afvoer wordt echter via de riolering naar RWZI's buiten het beheersgebied gebracht.

Figuur 94, Figuur 95 en Figuur 96 geven de ruimtelijke verdeling van oppervlakte-afvoer in landelijk gebied. De oppervlakte-afvoer in landelijk gebied is het hoogst in de kleigebieden. Volgens de toekomstscenario's verandert het patroon niet zichtbaar. De gemiddelde jaarlijkse som van riooloverstort is per scenario voor alle stedelijke plots gelijk. Voor de huidige situatie is dit 34 mm. Voor de toekomstscenario's is dit respectievelijk 40 mm (G+) en 45 mm (W+). Dit zorgt samen met de toename aan stedelijk gebied rond 2050 voor meer rioolwater in het oppervlaktewater. Hierbij is geen rekening gehouden met een toename van het oppervlak verhard gebied dat in de toekomst mogelijk afgekoppeld wordt van de riolering.

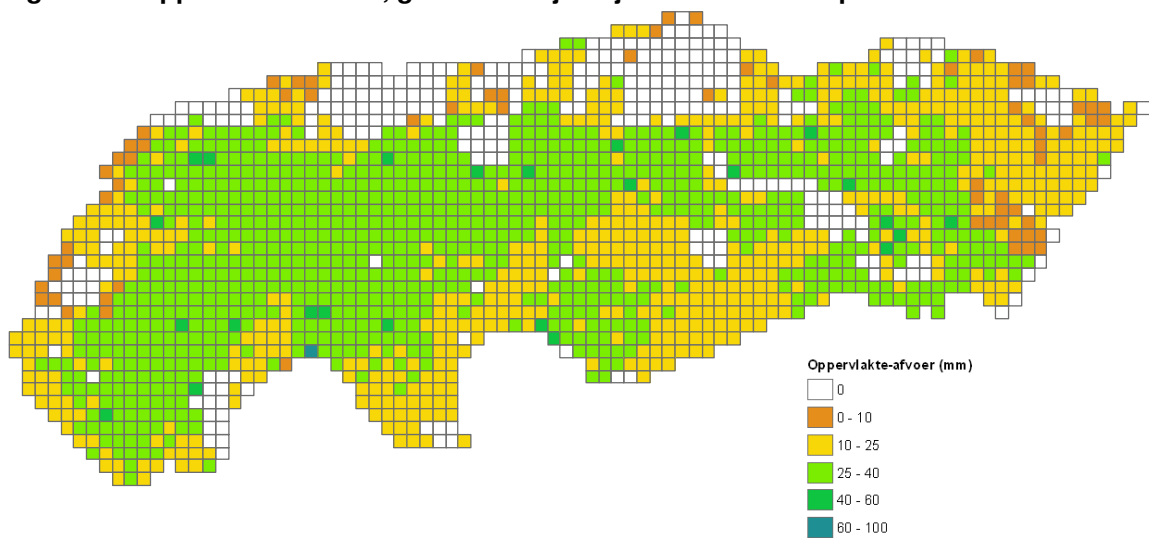


**Figuur 93: Runoff, gemiddelde per maand voor de periode 1995-2004 voor de huidige situatie, het G+ en het W+ scenario.**

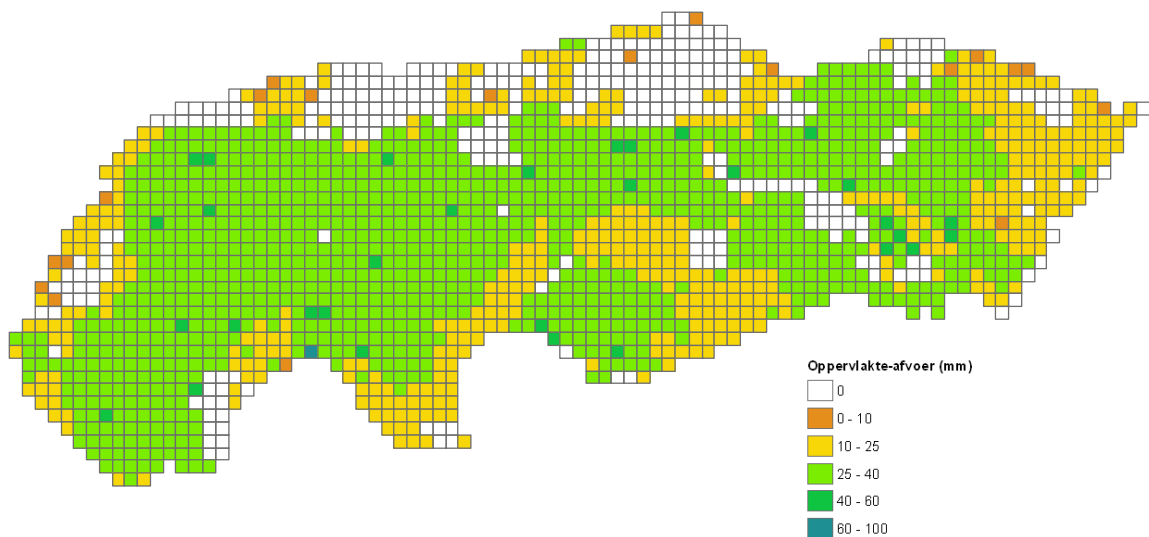




**Figuur 94: Oppervlakte-afvoer, gemiddelde jaarlijkse som over de periode 1995-2004.**



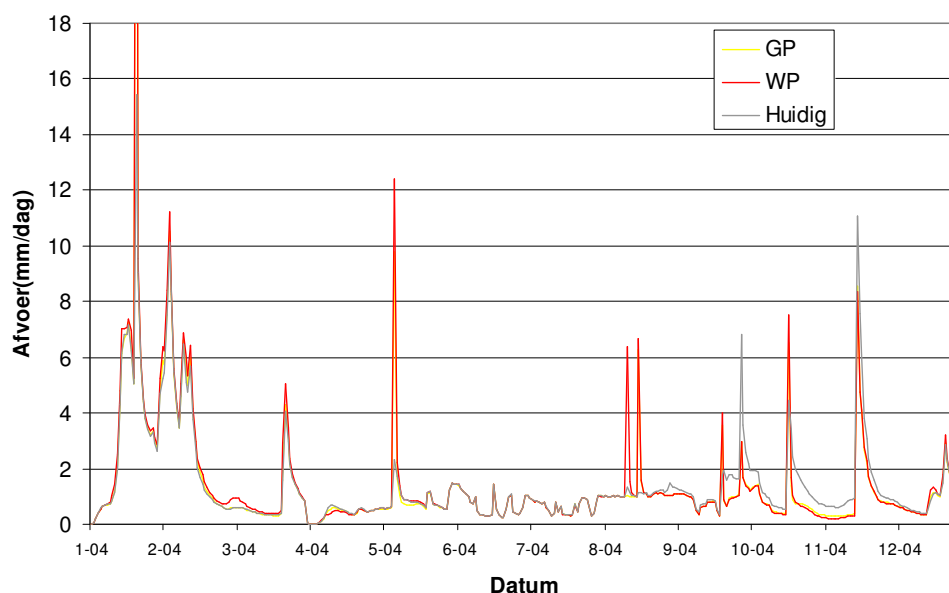
**Figuur 95: Oppervlakte-afvoer, gemiddelde jaarlijkse som rond 2050 volgens het G+ scenario.**



**Figuur 96: Oppervlakte-afvoer, gemiddelde jaarlijkse som rond 2050 volgens het W+ scenario.**

### 5.2.6 Afvoer

Figuur 97 geeft de gesimuleerde afvoer weer bij het hoofdgemaal van de polder voor het (getransformeerde) jaar 2004 voor de huidige situatie, het G+ scenario en het W+ scenario. Hierbij is aangenomen dat rond 2050 dezelfde hoeveelheid water wordt aangevoerd. Over het algemeen wijzigt de afvoer niet sterk. Alleen in pieksituaties neemt de afvoer voor de toekomstscenario's aanzienlijk toe. Opvallend is dat in het najaar de afvoer afneemt. Het neerslagoverschot wordt niet afgevoerd maar gebruikt om het grondwater en het bodemvocht aan te vullen. Volgens de toekomstscenario's is de afvoer pas halverwege december weer op het niveau van de huidige situatie.

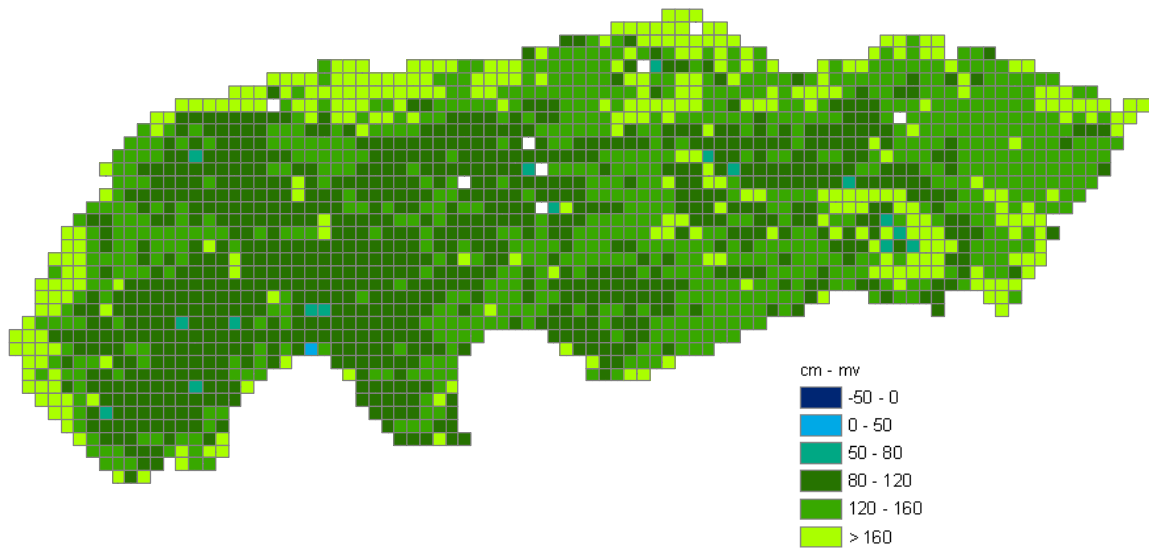


**Figuur 97: Gesimuleerde afvoer bij het hoofdgemaal van de polder voor de huidige situatie en voor het G+ en het W+ scenario voor het (getransformeerde) jaar 2004.**

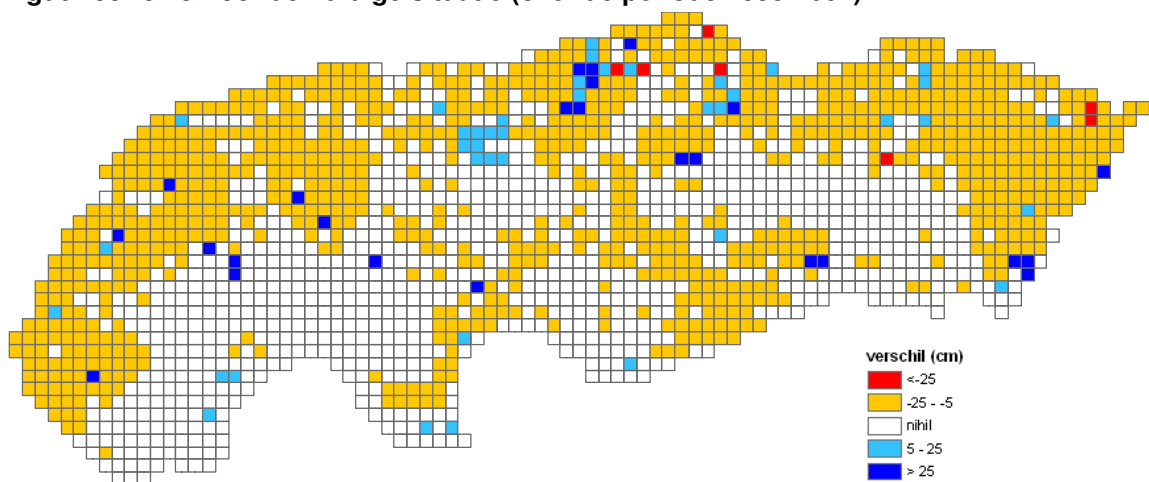
### 5.2.7 Grondwater Regime

Figuur 98 en Figuur 101 geven het huidige grondwaterregime weer in de polder uitgedrukt als Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) en Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG). Figuur 99 en Figuur 100 geven de verschilplaatjes weer voor de GLG voor respectievelijk het G+ en het W+ scenario. Figuur 102 en Figuur 103 zijn de verschilplaatjes met betrekking tot de GHG. Over het algemeen zijn de grondwaterstanden rond 2050 lager volgens het G+ en het W+ scenario. De Gemiddeld Laagste Grondwaterstand daalt het meest. Opvallend is dat ook de gemiddeld Hoogste Grondwaterstand vooral in het midden van de polder daalt.

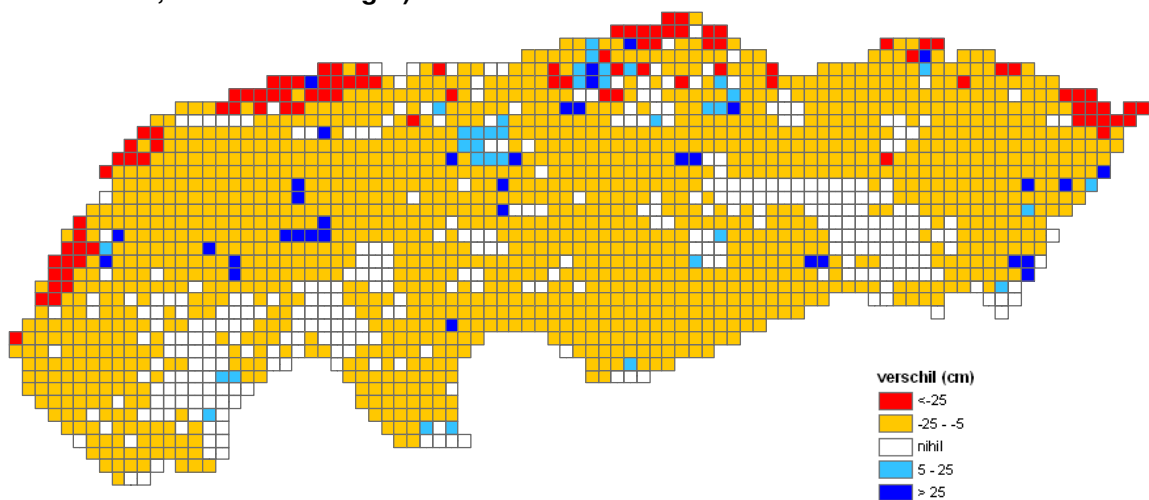




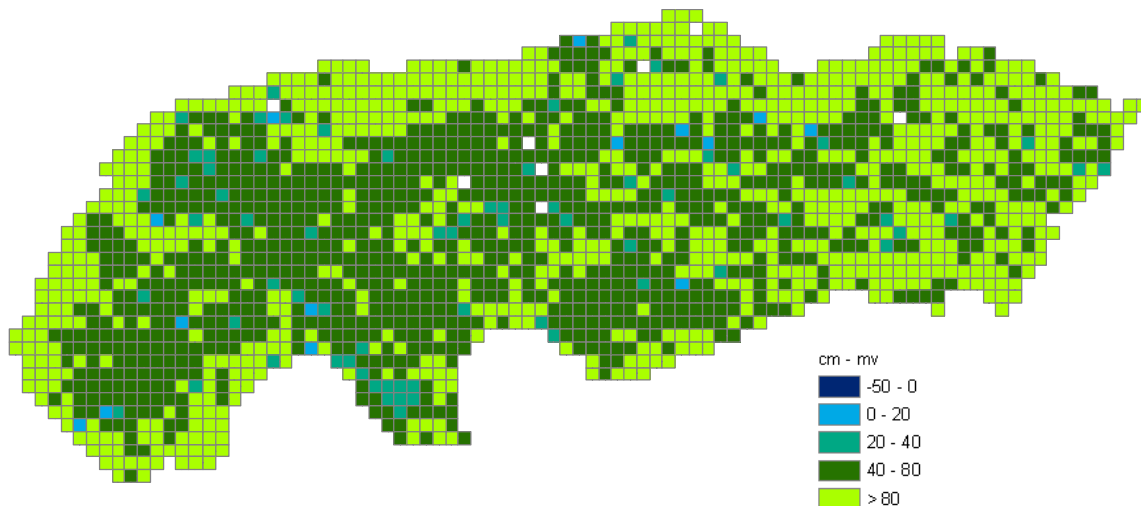
**Figuur 98: GLG voor de huidige situatie (over de periode 1995-2004).**



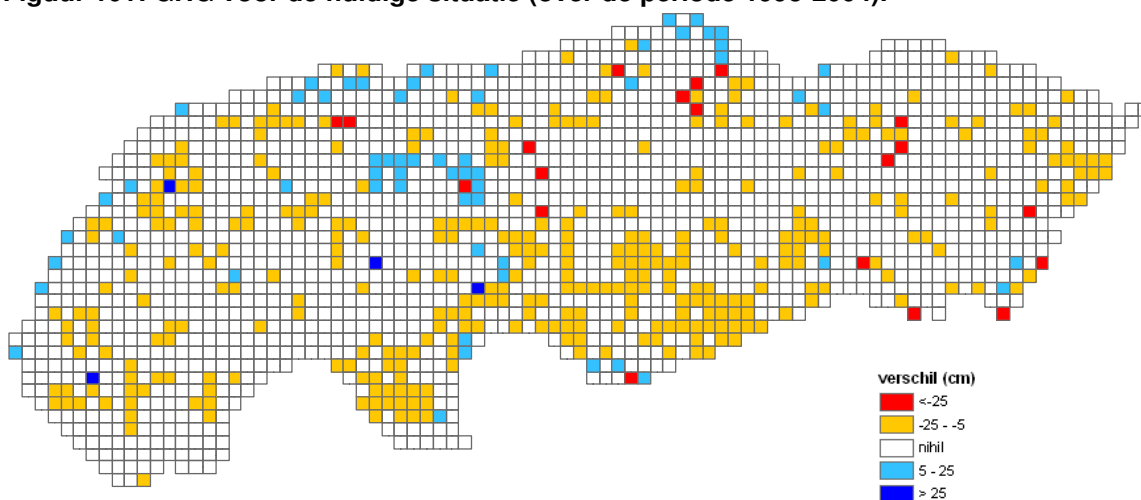
**Figuur 99: Verschil in GLG tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (blauw wordt natter, rood wordt droger).**



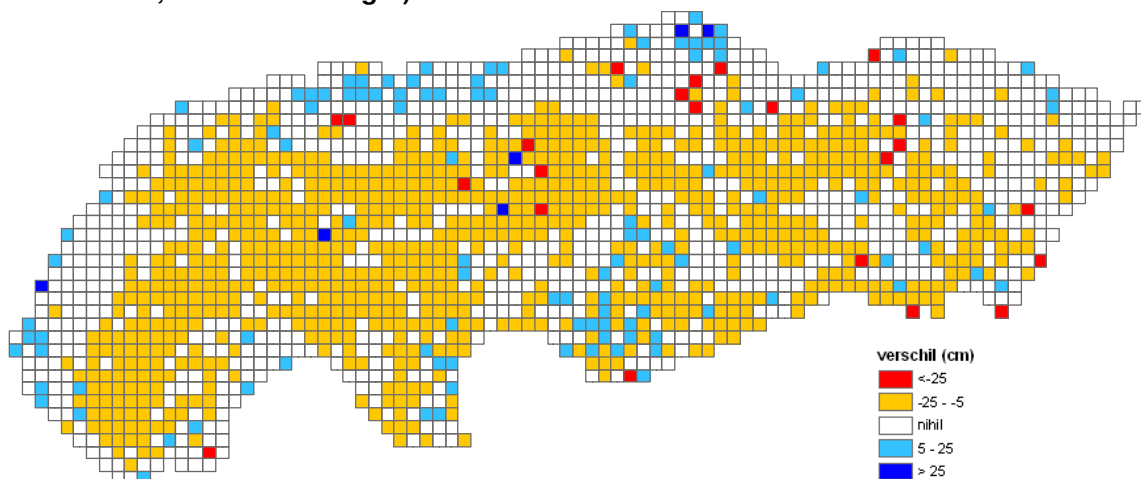
**Figuur 100: Verschil in GLG tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (blauw wordt natter, rood wordt droger).**



**Figuur 101: GHG voor de huidige situatie (over de periode 1995-2004).**



**Figuur 102: Verschil in GHG tussen scenario G+ rond 2050 en de huidige situatie (blauw wordt natter, rood wordt droger).**



**Figuur 103: Verschil in GHG tussen scenario W+ rond 2050 en de huidige situatie (blauw wordt natter, rood wordt droger).**

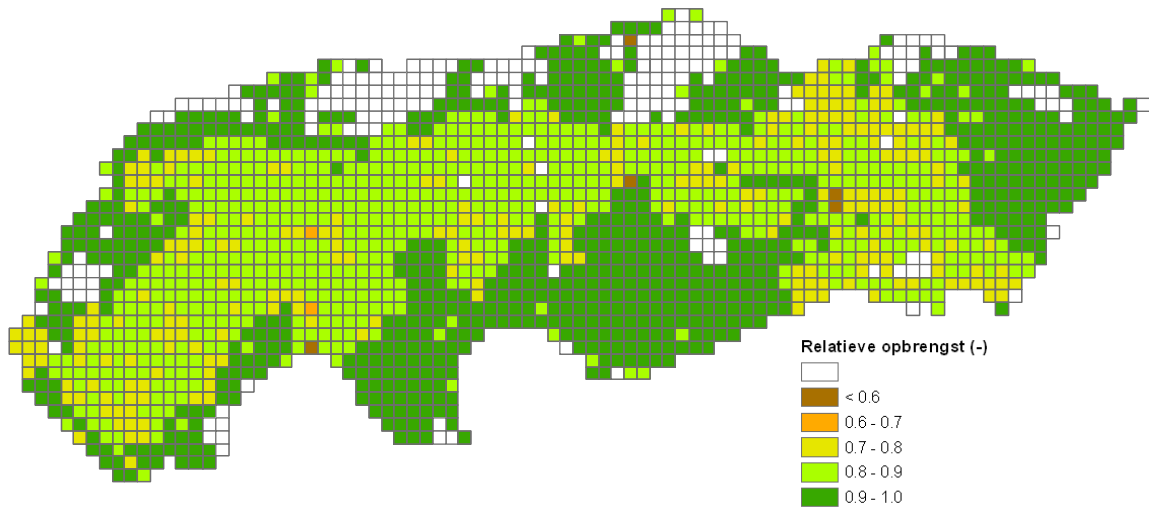


### 5.2.8 Landbouwoopbrengsten

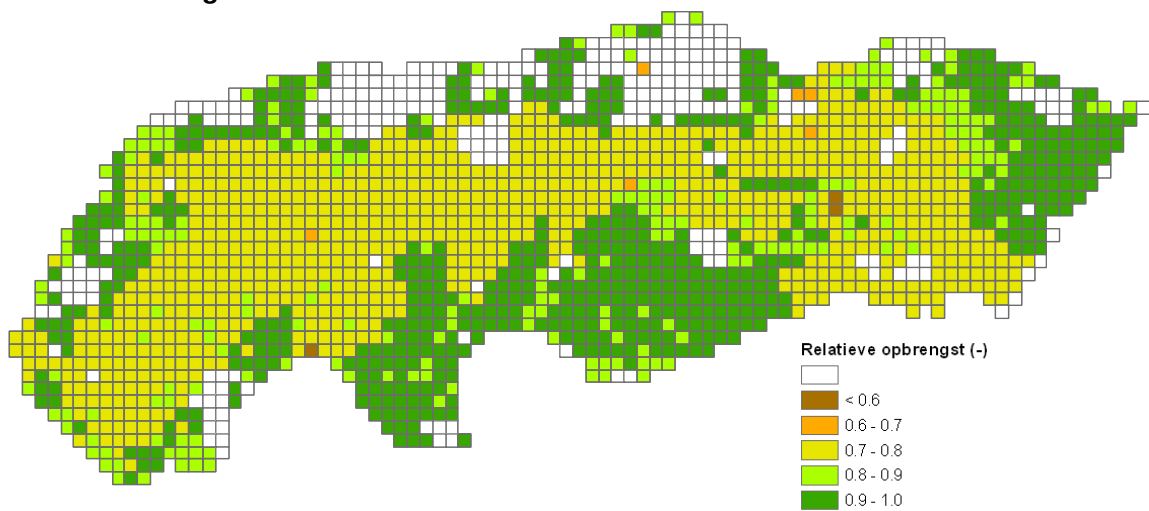
De gemiddelde relatieve opbrengst is evenredig met de verhouding tussen actuele en potentiële verdamping en een groeiseizoen afhankelijke factor. De relatieve opbrengsten zijn ruimtelijk weergegeven aan het eind van het groeiseizoen (30 september).

Figuur 104, Figuur 105 en Figuur 106 geven de relatieve opbrengst weer voor een gemiddelde zomer in respectievelijk de huidige situatie en voor de situatie rond het jaar 2050 volgens het G+ en W+ scenario. In de huidige situatie is de opbrengstreductie voor de zware kleigrond het hoogst (10%-30%). De waterretentie karakteristieken van deze gronden is zo sterk dat de wortels minder goed in staat zijn water op te nemen. Bovendien vindt op kleigronden meer runoff plaats. Voor de zandgronden zijn de opbrengsten goed. Volgens de toekomstscenario neemt de opbrengstreductie rond 2050 flink toe. Volgens het G+ scenario alleen op de kleigronden. Maar volgens het W+ scenario is er ook op de zandgronden een opbrengstreductie van ongeveer 20%. De gemiddeld relatieve opbrengst aan het eind van een gemiddeld groeiseizoen is volgens het W+ scenario vergelijkbaar met die van het extreem droge jaar 2003 (zie Figuur 107). Enige nuancering is echter op zijn plaats. In het huidige model is geen berekening meegenomen en in werkelijkheid zullen tekorten deels gecompenseerd worden door extra water aan te voeren (indien mogelijk). Ook is het zo dat de potentiële landbouwoopbrengsten zullen toenemen door zowel het temperatuurseffect als het CO<sub>2</sub>-effect.

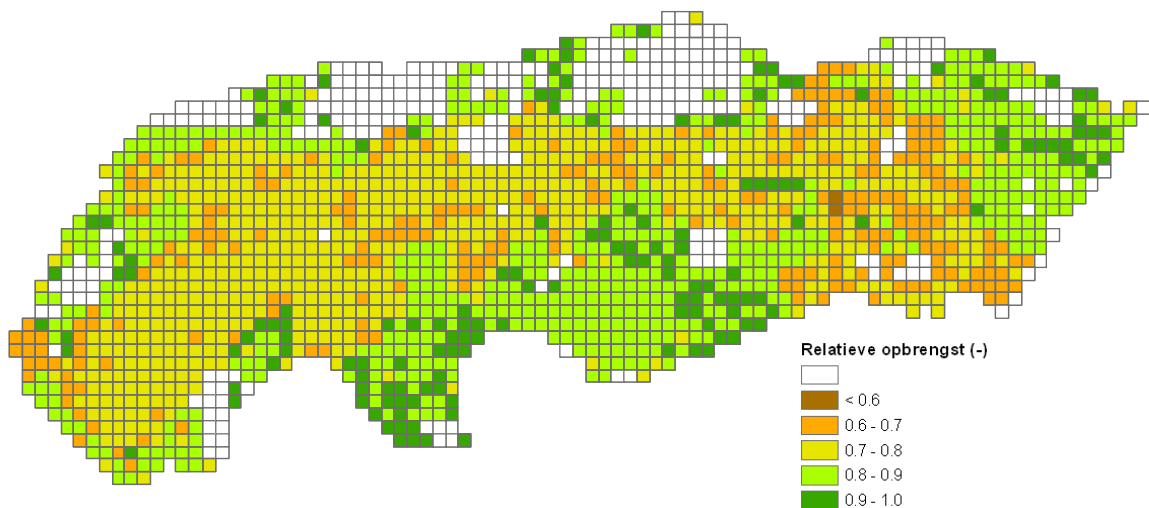
Figuur 107, Figuur 105 en Figuur 109 geven de relatieve opbrengst weer voor een droge zomer (2003) in respectievelijk de huidige situatie en voor de situatie rond het jaar 2050 volgens het G+ en W+ scenario. In 2003 was de opbrengstreductie duidelijk hoger dan voor een gemiddelde zomer. Op de kleigronden kunnen deze reducties oplopen tot plaatselijk 40% en op de zandgronden is de opbrengstreductie ongeveer 20%. In een droge zomer rond 2050 is de opbrengstreductie in het gehele kleigebied opgelopen tot 40% en is de opbrengst op zandgronden nog eens 10% lager dan in de huidige situatie.



**Figuur 104: Gemiddelde relatieve opbrengst voor het groeiseizoen voor de periode 1995-2004 in de huidige situatie.**



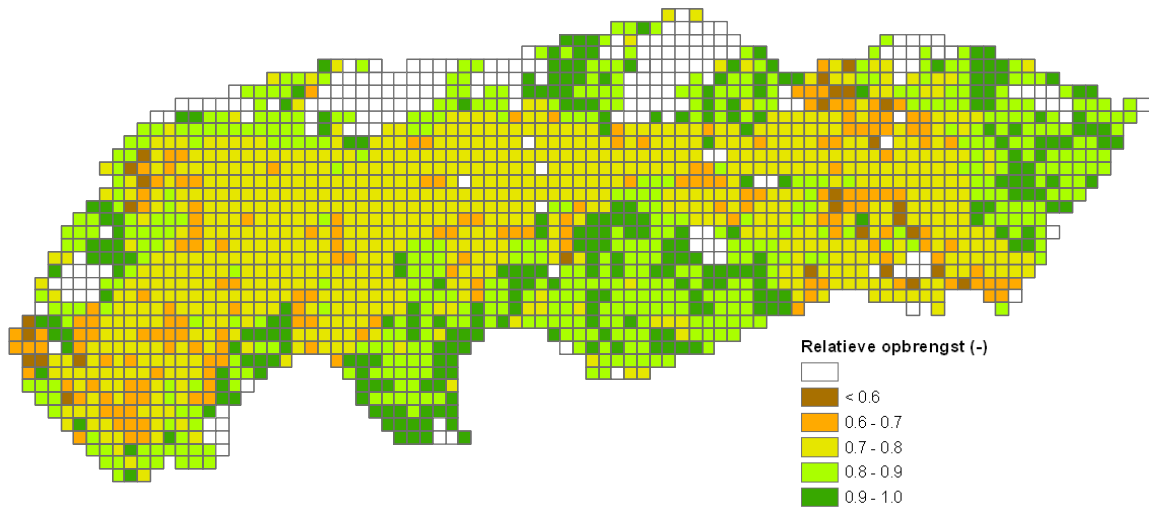
**Figuur 105: Gemiddelde relatieve opbrengst voor het groeiseizoen rond 2050 voor het G+ scenario.**



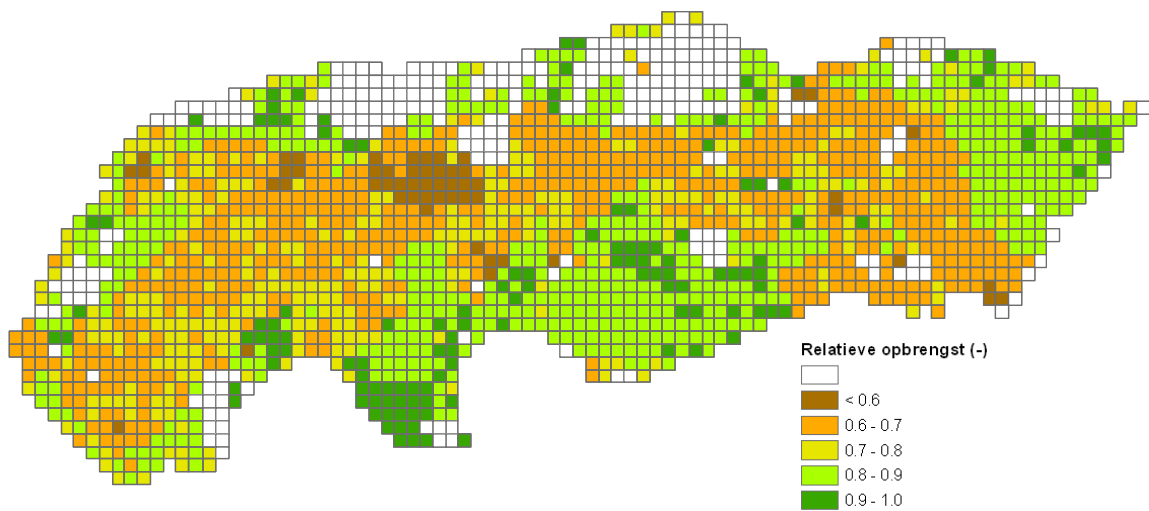
**Figuur 106: Gemiddelde relatieve opbrengst voor het groeiseizoen rond 2050 voor het W+ scenario.**



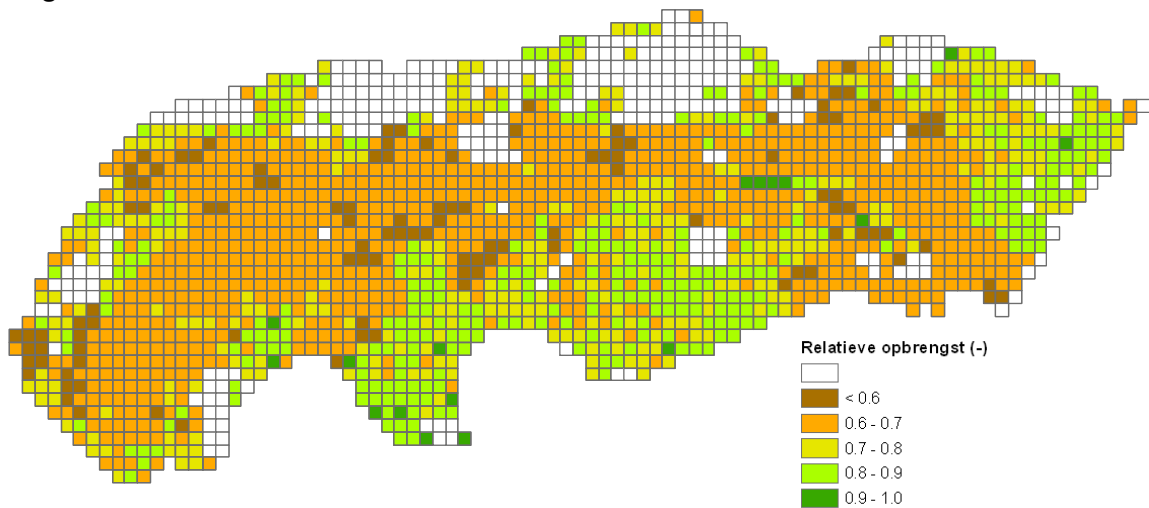




**Figuur 107: Relatieve opbrengst voor het groeiseizoen van 2003 voor de huidige situatie.**



**Figuur 108: Relatieve opbrengst voor het groeiseizoen voor een droge zomer rond 2050 volgens het G+ scenario.**



**Figuur 109: Relatieve opbrengst op 30 september voor een droge zomer rond 2050 volgens het W+ scenario.**



# 6 Conclusies en Aanbevelingen

## 6.1 Conclusies

### 6.1.1 Modelverbetering

De modelverbeteringen hebben geleid tot een duidelijke verbetering van de simulatie van de hydrologische processen in de polder Quarles van Ufford. De belangrijkste verbeteringen zijn:

- Met het aanpassen van gewasfactoren en de interceptiecoëfficiënt is de gewasverdamping en de interceptie naar beneden toe bijgesteld en reëler geworden.
- Door het aanpassen van enkele SWAP-parameters bleek het mogelijk de oppervlakteafvoer en verdamping in stedelijk gebied waarheidsgetrouw te modelleren.
- Het aanpassen van de kwelfactor en de zandbaanconstante heeft de netto kwel doen toenemen en ervoor gezorgd dat ook op grotere afstand van de rivier kwel en wegzijging wordt berekend.
- Het aanpassen van drainage- en infiltratieweerstanden heeft met name geleid tot meer infiltratie in de zomer.
- Het opnemen van wateraanvoer in de oppervlaktewatermodule heeft geleid tot een betere simulatie van de afvoer in de zomerperiode.
- Het opnemen van riooloverstort in de oppervlaktewatermodule heeft geleid tot een betere simulatie van piekafvoeren.

Het onderzoek naar modelverbeteringen hebben een aantal inzichten, mogelijkheden en concepten opgeleverd die ook in ander studies bruikbaar kunnen zijn:

- De gevoeligheidsanalyse met betrekking tot verdamping geeft duidelijk weer welke SWAP-parameters van invloed zijn op de processen interceptie, transpiratie en verdamping.
- Het in FutureViewR geïmplementeerde concept voor stedelijk gebied is ook bruikbaar in andere modellen.
- Het voorkomen van zandbanen bemoeilijkt het gebruik van de analytische formule in de kwelmodule. Afhankelijk van de doorlatendheid van de aquifer is de zandbaanconstante niet constant maar afhankelijk van de afstand tot de rivier en de diepte van de zandbaan. Bovendien veroorzaakt het voorkomen van zandbanen dat de kwel, ook op locaties waar de zandbaan ontbreekt, afwijkt van de berekening met de analytische kwelfactor.
- De kwelmodule van FutureViewR neemt alleen het effect van de rivier mee. Het onlangs opgeleverde Modflowmodel voor het gehele waterschap Rivierenland kan meer inzicht geven met betrekking tot kwel en wegzijging als gevolg van hoogteverschillen binnen en buiten de polder.
- FutureViewR is opgebouwd uit 1-dimensionale SWAP-modellen zonder horizontale uitwisseling. Dit beperkt de mogelijkheden om verder ruimtelijk naar te schalen.
- Met de verbeterde oppervlaktewatermodule is het nu ook mogelijk een balans op te stellen met betrekking tot het oppervlaktewater.
- Bij het opstellen van de maandelijkse waterbalans op basis van metingen wordt de netto kwel of wegzijging gebaseerd op de restterm van de waterbalans rekening houdend met een inschatting van de maandelijkse bergingsverandering. Een realistische inschatting van deze bergingsverandering met behulp van modelberekeningen is essentieel om zinvolle waarden voor kwel en wegzijging te verkrijgen.



### 6.1.2 *Regenradar en effecten op de hydrologische processen*

Het gebruik van regenradar in plaats van puntgegevens met betrekking tot neerslag heeft effect op de door FutureViewR gesimuleerde hydrologische processen. De onderstaande conclusies gelden alleen voor het geanalyseerde jaar 2004 en zijn niet algemeen geldend.

- De jaarsom van de neerslag is volgens radar iets lager dan volgens station Megen. Op bepaalde dagen kunnen de verschillen groot zijn. Dit betreft met name de hevige convectieve buien in de zomer.
- De neerslagverdeling in tijd en ruimte van de regenradar is beter voor de vochtvoorziening van het gewas en maakt dat er meer verdamping plaatsvindt wanneer regenradar als modelinvoer wordt gebruikt. Om dezelfde reden is in dit geval de drainage lager evenals de infiltratie.
- Er is nauwelijks verschil in berekende kwel en wegzijging. De verandering in berekende grondwaterstanden is te gering om een wijziging in kwel- en wegzijgingspatronen te veroorzaken.
- Hoewel de runoff op jaarbasis nauwelijks wijzigt kunnen de verschillen op maandbasis groot zijn als gevolg van verschillen in neerslagintensiteit.
- De oppervlakte-afvoer in landelijk gebied is met neerslag volgens station Megen duidelijk hoger. Dit komt omdat radar toevalligerwijs minder intense buien geeft boven kleigebied waar de infiltratiecapaciteit van de bodem het laagste is. De hoeveelheid riooloversort varieert ruimtelijk bij gebruik van regenradar.
- De gesimuleerde afvoer wijzigt met name voor pieksituaties. Neerslag volgens radarbeelden geeft voor 2004 geen betere afvoersimulatie dan neerslag volgens station Megen.

### 6.1.3 *Klimaat- en landgebruik scenario's voor 2050 en de effecten op hydrologische processen*

Met het verbeterde model zijn twee integrale toekomstscenario's doorgerekend met als zichtjaar 2050. Het betreft klimaatverandering volgens het G+ en het W+ scenario van het KNMI en de hiermee samenhangende wijziging in rivierwaterstanden en landgebruik. Volgens berekeningen met FutureViewR zijn in de toekomst veranderingen in hydrologie te verwachten. Hieronder volgen de belangrijkste conclusies:

- Het effect van de toekomstscenario's is voor sommige processen gering als gekeken wordt naar een gemiddeld jaar. De verschillen binnen een jaar en tussen de jaren onderling kunnen echter aanzienlijk zijn.
- De actuele verdamping blijft nagenoeg gelijk terwijl de verdampingsvraag toeneemt. Vooral in de zomer zal daarom meer wateraanvoer nodig zijn om gewasopbrengsten te garanderen.
- In de winter en het voorjaar neemt de kwel onder invloed van de stijgende rivierwaterstanden toe. In de zomer zijn de rivierwaterstanden lager en neemt de kwel af. In augustus en september van een gemiddeld jaar vindt er zelfs een omslag plaats van netto kwel in de huidige situatie tot netto wegzijging volgens het W+ scenario. De toename van de nu reeds hoge kwel in een extreem natte winter zal rond 2050 aanzienlijk toenemen in een brede strook langs de rivieren.
- Volgens de toekomstscenario's zullen drainage- en infiltratiepatronen binnen het jaar gaan veranderen. In het voorjaar neemt de drainage toe onder invloed van een toename van de



neerslag en de kwel. In de zomer neemt de infiltratie toe onder invloed van een afname van de neerslag en een toename van de wegzijging.

- Hoewel in de zomer meer water zal infiltreren vormt de infiltratieweerstand een belemmering. Om de vochtvoorziening van het gewas te verbeteren zal beregend moeten worden.
- Opvallend is dat in de toekomst de drainage en de afvoer in het najaar af zal nemen ten opzichte van de huidige situatie. Het neerslagoverschot wordt in deze maanden niet afgevoerd maar gebruikt om het grondwater en het bodemvocht aan te vullen. Volgens de toekomstscenario's is de afvoer pas halverwege december weer op het niveau van de huidige situatie.
- Door een toename van extreme buien neemt de runoff en de piekafvoer toe.

## 6.2 Aanbevelingen

De bovengenoemde conclusies zijn relevant voor het water beheer en waterbeleid voor het waterschap. Daarnaast zijn er een aantal aanbevelingen voor vervolgtoeepassing en ontwikkeling van modellen:

- Het modelinstrumentarium is nu voldoende getest op de polder Quarles van Ufford. Toepassing van FutureViewR in andere gebieden is een logische volgende stap.
- In de kwelmodule van FutureViewR is alleen kwel vanuit de rivier opgenomen. Om ook kwel en wegzijging als gevolg van andere stijghoogtegradiënten mee te kunnen nemen is een grondwatermodel noodzakelijk. In de toekomst zou mogelijk de onderrandvoorwaarde voor SWAP overgenomen kunnen worden uit het recent opgeleverde grondwatermodel.
- Voor een meer realistische berekening van de verdamping en een correcte waterbalans van het open water moet in een volgende studie berekening opgenomen worden. Dit kan gecombineerd worden met toekomstscenario's rekening houdend met een beperking van het beschikbare inlaatwater.
- In deze studie zijn met name gemeten en berekende afvoeren met elkaar vergeleken voor het hoofdgemaal van de polder. Een goed alternatief is om voor kalibratie gebruik te maken van verdampingsbeelden afgeleid van satellietwaarnemingen. Ook kunnen gemeten grondwaterstanden betrokken worden bij de kalibratie.
- Met name vanuit waterkwaliteitsoogpunt wil waterschap Rivierenland meer inzicht in de herkomst van het oppervlaktewater. SWAP biedt de mogelijkheid om een tracer toe te voegen zodat duidelijk is welk deel van de drainage bestaat uit regenwater en welk deel uit kwelwater. Deze methode kan tevens behulpzaam zijn om voor bijvoorbeeld kwelafhankelijke natuur vast te stellen in hoeverre kwelwater de wortelzone bereikt.
- FutureViewR is opgebouwd uit 1-dimensionale SWAP-modellen zonder horizontale uitwisseling. Voor de onverzadigd zone is dit correct maar met betrekking tot de verzadigde zone beperkt het de mogelijkheden om verder ruimtelijk neer te schalen. Het zou interessant zijn om te kijken of zo'n horizontale uitwisseling tot stand kan worden gebracht.
- Nader onderzoek naar het gebruik van regenradar is wenselijk. Enerzijds kan dit door de analyse uit te breiden tot meerdere jaren en niet alleen afvoermetingen maar tevens verdampingsbeelden te gebruiken. Anderzijds strekt het tot aanbeveling uit te gaan van de ongekalibreerde radargegevens van het KNMI (en niet het reeds bewerkte product van MeteoConsult) en deze te kalibreren met behulp van de stationsgegevens uit het beheersgebied. Mogelijk kan op deze wijze de bruikbaarheid van regenradar vergroot worden.

- Tot nu toe is met betrekking tot klimaatverandering gefocussed op de drogere G+ en W+ scenario's. Het is een aanbeveling om tevens het W klimaatscenario door te rekenen. Dit scenario is met betrekking tot wateroverlast het meest extreem.
- In het kader van BSIK Klimaat voor Ruimte is een 1000-jarige reeks gegenereerd met betrekking tot neerslag en rivierwaterstanden. Deze reeks zou voor een aantal representatieve swapkolommen doorgerekend kunnen worden. Op deze wijze zijn zowel uitspraken te doen over de effecten van klimaatverandering op de hydrologie als op de kans van deze klimaateffecten.
- Het is zinvol de uitkomsten van deze modelstudie te vergelijken met de uitkomsten van andere studies voor de polder Quarles van Ufford zoals "monitoring stroomgebieden" en de resultaten van het MORIA-instrumentarium.



- Aerts et al. 2008. Aandacht voor veiligheid. Eindrapportage (draft). IVM, Instituut voor Milieuvraagstukken, Amsterdam.
- CPB/MNP/RPB, 2006. Welvaart en leefomgeving. Rapportnummer 500081001. Centraal Planbureau/Milieu- en Natuurplanbureau/Ruimtelijk Planbureau, Den Haag/Bilthoven.
- Deursen, W. van, 2002. Klimaatveranderingen in de stroomgebieden van Rijn en Maas, Carhago Consultancy.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. In: Versl. en Meded. 39:p. 33-45. Comm. Hydr. Onderz. TNO, 's-Gravenhage.
- Heerwaarden, C.C. van, P. Droogers en R. Loeve, 2005. Kwel en wegzijging langs de grote rivieren, een nieuwe modelmatige aanpak. FutureWater, Wageningen.
- Hurk, B. van den, A. Klein Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsmen, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger en S. Drijfhout. 2006. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands, KNMI Scientific Report WR 2006-01.
- Heijkers J. en T. Wendt, 2005. Stedelijk-hydrologische modellering, beleidsmatige problematiek, aanpak en eerste resultaten. Stromingen 11 (2005), nummer 1.
- Immerzeel, W.W., 2007b. Gebruik van regenradar gegevens in het waterbeheer van Waterschap Rivierenland. FutureWater, Wageningen.
- Immerzeel, W.W., 2007a. Vergelijk resultaten van twee modelstudies voor de polder Quarles van Ufford. FutureWater report 70, FutureWater, Wageningen.
- Immerzeel, W.W., 2007b. Gebruik van regenradar gegevens in het waterbeheer van Waterschap Rivierenland. FutureWater, Wageningen.
- Immerzeel, W.W., C.C. van Heerwaarden en P. Droogers, 2007. FutureViewR: gedetailleerd hydrologisch en oppervlaktewater model getest op Quarles van Ufford. FutureWater, Wageningen.
- KNMI, 1999. De Toestand van het klimaat in Nederland 1999. Climate report of KNMI, De Bilt, the Netherlands.
- KNMI, 2006. Climate Change in the 21<sup>st</sup> century: Four scenarios for the Netherlands; Brochure (16pp), Available from KNMI, PO Box 201, 3730 AE De Bilt, The Netherlands.
- Koskamp M., 2007. Waterbalans deelstroomgebieden Quarles van Ufford en BLoemers, een eerste aanzet voor gebiedsbalansen van de hydrologische jaren 2004, 2005 en 2006. Stageverslag, Wageningen Universiteit en Waterschap Rivierenland, Wageningen/Tiel.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2, Theory description and user manual. Alterra-report 1649, ISSN 1566-7197, ALterra, Wageningen.
- Lenderink, G., 2006. KNMI'06 scenario's, interpolation to monthly changes. KNMI.
- Linden, van der W., W. Berendrecht, G. Hendriksen, A. Veldhuizen, H. Massop, A. Heuven, W.J. Zaadnoordijk, 2008. Grondwatermodellering Rivierenland MORIA. TNO/Deltares/Royal Haskoning /Tauw/Alterra, Deltares/TNO rapport 2008-U-R0827/A.
- Massop, H.Th.L., T. Kroon, P.J.T. van Bakel, W.J. de Lange, A. van der Giessen, M.J.H. Pastoors, J. Huygen, 2000. Hydrologie voor STONE, schematisatie en parametrisatie. Alterra-rapport 038, Reeks Milieuplanbureau 9, Alterra/RIZA/RIVM, Wageningen/Lelystad/Bilthoven.

- Massop, H.Th.L., and P.A.J.W. de Wit, 1994. Hydrologisch onderzoek naar de weerstanden van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland. Report 373, Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 132 p.
- Milieu- en Natuurplanbureau, 2007. Nederland Later: Tweede Duurzaamheidsverkenning, deel fysieke leefomgeving Nederland. MNP, Bilthoven.
- Soppe, R.W.O., J. Roelsma, E. Bergersen en F.J.E. van der Bolt, 2005. Systeemverkenning Quarles van Ufford. Alterra-rapport 970, Alterra, Wageningen.





# Bijlage I: Achtergrond bij kalibratie

In hoofdstuk 2 van deze rapportage zijn een aantal modelverbeteringen doorgevoerd. Het betreft verbeteringen op de onderdelen verdamping, stedelijk gebied, kwel en wegzijging, waterinlaat, infiltratie, drainage en oppervlaktewater. De samenhang tussen processen is groot. Zo heeft een aanpassing van verdamping tevens invloed op de processen infiltratie en drainage. De uiteindelijke modelaanpassing heeft voor de meeste onderdelen pas plaatsgevonden na een tussentijdse vergelijk van waterbalansen op basis van modeluitkomsten en metingen en in overleg met de begeleidingsgroep van Waterschap Rivierenland. De tussentijdse waterbalans is opgesteld na gereedkoming van de aanpassingen met betrekking tot stedelijk gebied maar voor de overige aanpassingen. Wel waren reeds alle analyses, vergelijkingen en gevoeligheidsanalyses uitgevoerd zodat een gefundeerde discussie tussen auteurs en begeleiders mogelijk was. In deze bijlage wordt de tussentijdse waterbalans vergelijking in zijn geheel opgenomen. Onderdelen ervan zijn tevens in de hoofdtekst opgenomen om een modelaanpassing te onderbouwen.

## Waterbalans op jaarbasis

Tabel 16 geeft de waterbalans voor 2002 voor de polder Quarles van Ufford op basis van FutureViewR en op basis van metingen. De restterm van de waterbalans op basis van FutureViewR representeert een verandering in waterberging in de bodem. De restterm van de waterbalans op basis van metingen representeert de netto kwel. Hierbij is aangenomen dat de bergingsverandering nihil is.

**Tabel 16: Waterbalans Quarles van Ufford op basis van FutureViewR (zonder oppervlaktewatermodule) en op basis van metingen voor 2002.**

FutureViewR		Metingen <sup>6</sup>	
IN	UIT	IN	UIT
Neerslag: 864	Verdamping: 583	Neerslag: 864	Verdamping: 457
Kwel: 162	Wegzijging: 5		
Infiltratie: 35	Drainage: 375	Inlaat: 167	Afvoer: 736
	Runoff: 91		
Som 1061	Som 1054	Som 1031	Som 1193
	Bodemberging 7	Netto Kwel 162	

## Waterbalans op maandbasis

### *Verdamping*

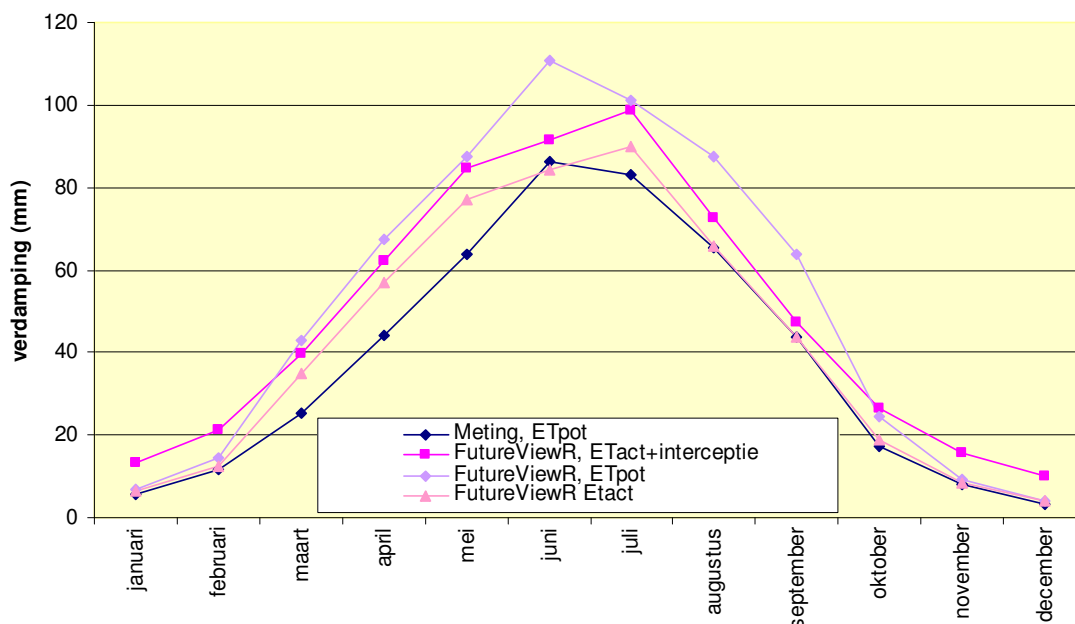
Figuur 110 geeft de verdamping in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. In de waterbalans op basis van metingen is de potentiële verdamping weergegeven op basis van de referentieverdamping volgens Makkink en gewasfactoren. De interceptieverdamping is niet meegenomen. In de waterbalans volgens FutureViewR is de som van actuele evapotranspiratie en de interceptieverdamping opgenomen in de waterbalans. Daarnaast is in Figuur 110 tevens de potentiële evapotranspiratie en de actuele evapotranspiratie volgens FutureViewR opgenomen. Opvallend is dat volgens FutureViewR de verdamping hoger is, ook als de interceptieverdamping buiten beschouwing

<sup>6</sup> Verdamping is niet direct gemeten maar afgeleid van de referentieverdamping volgens Makkink en gewasfactoren. Het betreft de potentiële verdamping.



wordt gelaten. Dit wordt met name veroorzaakt door een hogere potentiële verdamping volgens FutureViewR. Hieronder volgen mogelijke oorzaken van de verschillen:

- Verschil in gebruikte cropfactor bij het omrekenen van referentieverdamping naar potentiële verdamping
- Gewassenstelling in FutureViewR gebaseerd op overheersende landgebruik per 250x250 m rastercel. Gewassenstelling in waterbalans gebaseerd op metingen gebaseerd op de Landgebruikskarta van Nederland met een resolutie van 25x25 m.
- In FutureViewR zijn akkerbouwgewassen samengevoegd. In de waterbalans gebaseerd op metingen is de potentiële verdamping per gewas apart bepaald
- In de waterbalans gebaseerd op metingen is aangenomen dat bebouwd gebied niet verdampt. In FutureviewR vindt op 30% van het bebouwd gebied verdamping plaats.

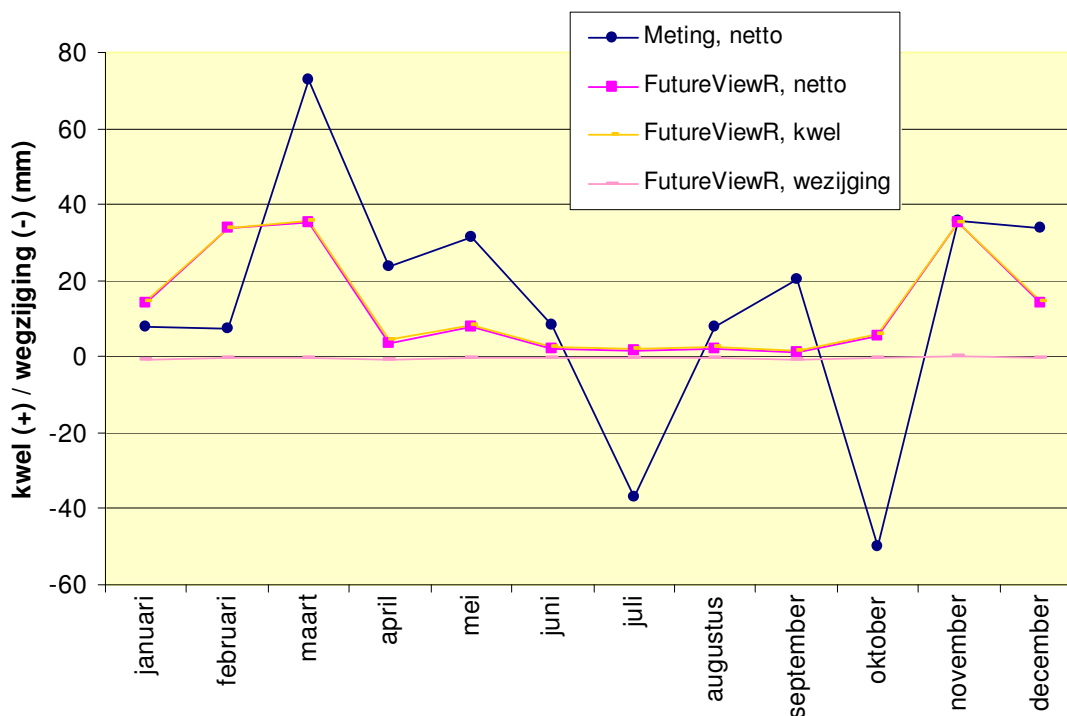


**Figuur 110: Verdamping in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureVlewR. Voor FutureViewR is naast de actuele verdamping zoals opgenomen in de waterbalans tevens de potentiële verdamping opgenomen en de weergegeven zonder meetelling van de interceptieverdamping.**

### *Kwel en Wegzijing*

Figuur 111 geeft de kwel en wegzijing in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. In de waterbalans op basis van metingen is een inschatting gemaakt van de maandelijkse bergingsverandering. De netto kwel of wegzijing is gebaseerd op de restterm van de waterbalans. Voor FutureViewR is behalve de netto-term tevens de kwel en wegzijing afzonderlijk opgenomen. De waterbalans op basis van metingen wijst uit dat in juli en oktober netto wegzijing plaatsvindt. In de kwelmodule van FutureViewR is de wegzijing verwaarloosbaar en treedt het gehele jaar netto kwel op.

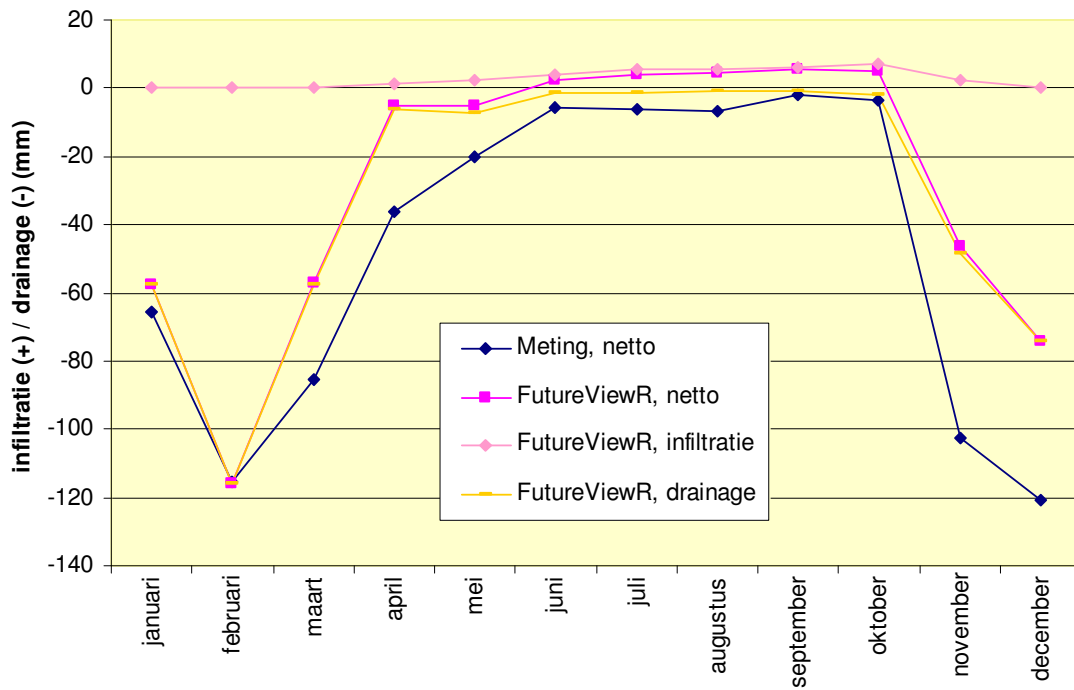




**Figuur 111: Netto kwel (positief) en wegzijging (negatief) in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. Voor FutureViewR zijn tevens de afzonderlijke kwel- en wezijingstermen opgenomen.**

#### *Infiltratie en Drainage*

Figuur 112 geeft de infiltratie en drainage in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. In de waterbalans op basis van metingen is de waterbalans voor het oppervlaktewater gebruikt. Hierbij is een inschatting gemaakt van de bergingsverandering bij omschakeling van zomer- naar winterpeil en omgekeerd. Het aandeel neerslag en verdamping is verwaarloosd en er is aangenomen dat kwel naar het oppervlaktewater alleen via drainage plaatsvindt. De netto drainage is gebaseerd op de restterm van de waterbalans. Voor FutureViewR is behalve de netto-term tevens de infiltratie en drainage afzonderlijk opgenomen. Het patroon van netto drainage volgens metingen en volgens FutureViewR is vergelijkbaar. De netto drainage op basis van FutureViewR is lager dan die op basis van metingen. In de zomermaanden berekent FutureViewR meer infiltratie dan drainage. De waterbalans op basis van metingen wijst uit dat het gehele jaar door netto drainage plaatsvindt.



**Figuur 112: Netto infiltratie (positief) of drainage (negatief) in 2002 volgens de maandelijkse waterbalans gebaseerd op metingen en gebaseerd op FutureViewR. Voor FutureViewR zijn tevens de afzonderlijke infiltratie- en drainagetermen opgenomen.**

