

KlimaatAdaptieve Drainage

Modelberekeningen met SWAP ter bepaling van effecten KAD op reductie van piekafvoeren en op waterconservering

Februari 2013

Auteurs

W. Terink
P.J.T. van Bakel (De Bakelse Stroom)
G.A.P.H. van den Eertwegh
P. Droogers

Opdrachtgever



Ministerie van Infrastructuur en Milieu

SBIR-project

Partners



Van Iersel



FutureWater Rapport 117

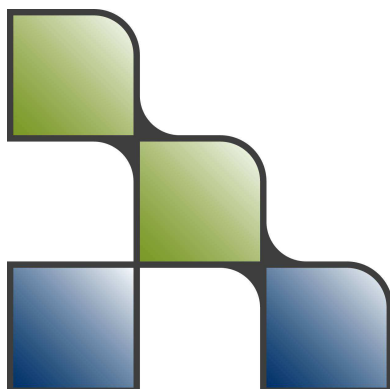
FutureWater

Costerweg 1V
6702 AA Wageningen
The Netherlands

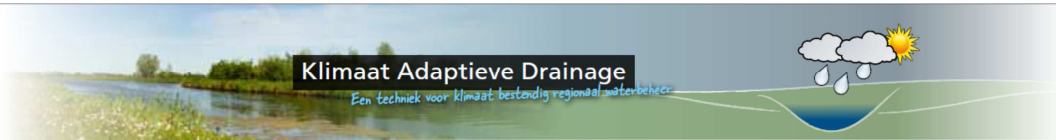
+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl







Samenvatting

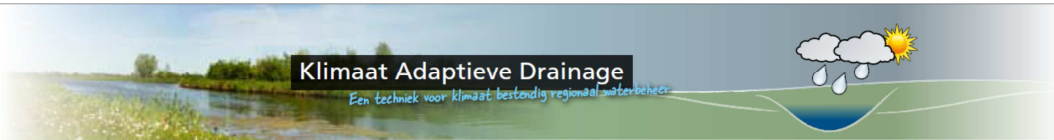
In het kader van een SBIR (Small Business Innovation Research) project, getiteld “Klimaatadaptieve Drainage, een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen” zijn drie KAD prototypen aan gelegd. Deze bevinden zich bij drie verschillende waterschappen (Brabantse Delta, Hunze en Aa’s, Regge en Dinkel). Elke KAD unit bestaat uit een samengesteld drainagesysteem, een op afstand regelbare put, en de volledige infrastructuur voor remote control.

De drie prototypen hebben ongeveer één jaar volledig gefunctioneerd in het veld, hetgeen een beperkte meetperiode opleverde. Er zijn mede daarom SWAP modellen gebouwd en gekalibreerd om te bepalen hoe de regelputten kunnen worden ingezet voor het reduceren van piekafvoeren en het verminderen van de wateraanvoerbehoefte. De rekenmodules gaven duidelijk aan dat een substantiële reductie in piekafvoeren mogelijk is van respectievelijk 12%, 16% en 21% bij buien met een herhalingsstijd van 10, 25 en 100 jaar. Bij grotere herhalingsstijden i.c. meer extremen is het positieve effect van KAD dus sterker. Er zijn wel een locatie-specifieke verschillen waarbij de condities in Marwijksoord door de aanwezigheid van keilemlagen minder effectief zijn voor KAD.

De effecten van verminderde wateraanvoerbehoefte zijn ook ingeschat met de rekenmodules. Gezien de doelstelling van het project is hier een wat beperktere analyse naar gedaan, maar de resultaten laten zien dat in droge jaren deze wateraanvoerbehoefte tot maximaal 70 mm kan worden verminderd. Voor gemiddelde jaren is deze reductie in wateraanvoerbehoefte echter minder, wat vooral verklaard kan worden door het feit dat de locaties van de prototypen niet droogtegevoelig zijn.

Deze bovengenoemde positieve effecten van KAD zijn te bereiken door een standaard sturing van de KAD put toe te passen. Het is waarschijnlijk dat een locatie-specifieke sturing i.c. per locatie en per neerslagevent, nog betere effecten zal laten zien van piekafvoerreductie en verminderde wateraanvoerbehoefte.

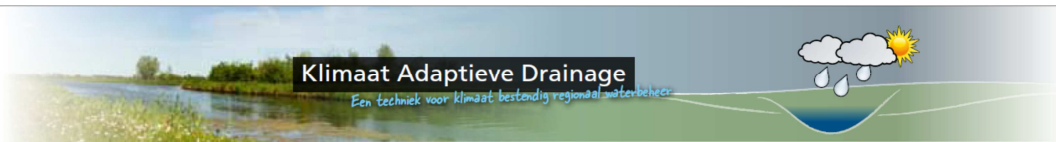




Inhoudsopgave

1	Relevantie	7
2	Introductie rekenmodules	9
2.1	Achtergrond rekenmodules	9
2.2	SWAP-model	9
3	Opzetten SWAP-modellen	11
3.1	Invoergegevens	11
	3.1.1 Haaksbergen	12
	3.1.2 Marwijksoord	12
	3.1.3 Rijsbergen	13
3.2	Kalibratie	15
	3.2.1 Haaksbergen	15
	3.2.2 Marwijksoord	17
	3.2.3 Rijsbergen	20
4	Klimaatveranderingen	22
4.1	KNMI-klimaatscenario's	22
4.2	Klimaattijdreeksen	24
4.3	Haaksbergen	26
4.4	Marwijksoord	29
4.5	Rijsbergen	31
5	Reductie piekafvoeren	34
5.1	Haaksbergen	34
5.2	Marwijksoord	41
5.3	Rijsbergen	46
6	Vermindering wateraanvoerbehoefte	51
7	Conclusies	58
8	Referenties	60





1 Relevantie

Op 17 mei 2011 heeft FutureWater de opdracht gekregen van AgentschapNL, handelend in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, voor het uitvoeren van een onderzoeks- en ontwikkelingsproject onder de titel "KlimaatAdaptieve Drainage, een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen" (SBIR113008). Dit project wordt uitgevoerd in het kader van de SBIR (Small Business Innovation Research) regeling. SBIR is een aanbestedingsinstrument waarbij de Nederlandse overheid de kracht van aanbesteding gebruikt voor het vinden van innovatieve oplossingen voor maatschappelijke vraagstukken.

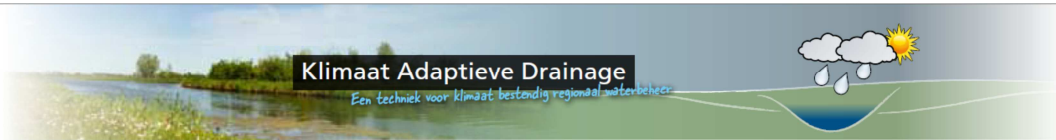
Het achterliggende concept van KlimaatAdaptieve Drainage is dat agrariërs en waterschappen samenwerken om water vast te houden in de bodem. Hierdoor zullen de extremere weersomstandigheden als gevolg van klimaatverandering opgevangen kunnen worden. Tijdens te verwachte extreme wateroverlast situaties kunnen benedenstroomse gebieden ontzien worden en tijdens droogte zal de wateraanvoer behoefte verminderen en. Dit wordt bereikt door een op afstand regelbaar drainage systemen in te zetten. Tijdens het onderzoeks- en ontwikkelingstraject zijn een aantal prototypen aangelegd en is de technische inzetbaarheid geëvalueerd en verfijnd. Daarnaast zijn de bestuurlijk-juridische concepten en kosten-baten analyse verder uitgewerkt. Het uiteindelijke doel is om KlimaatAdaptieve Drainage in 2013 op grote schaal aan te bieden.

De partners waar FutureWater mee samenwerkt in dit project zijn:

- Kuipers Electronic Engineering (KEE)
- De Bakelse Stroom
- Wageningen UR-Alterra
- Van Iersel
- STOWA

Details en verdere achtergronden van het project kunnen gevonden worden in het projectvoorstel en op de project-website: <http://www.futurewater.nl/kad> .





2 Introductie rekenmodules

2.1 Achtergrond rekenmodules

Het doel van de rekenmodules is om aan te tonen dat KlimaatAdaptieve Drainage inderdaad bijdraagt aan een vermindering van piekafvoeren die ontstaan ten gevolge van klimaatverandering. Om de bijdrage van KlimaatAdaptieve Drainage op de vermindering van piekafvoer aan te kunnen tonen moeten rekenmodules ontwikkeld worden die i) de huidige situatie nabootsen, ii) de situatie nabootsen rond 2050, en (iii) de situatie nabootsen in 2050 indien KlimaatAdaptieve Drainage wordt geïmplementeerd. Door de rekenmodules van de verschillende situaties met elkaar te vergelijken, kan een uitspraak gedaan worden over de bijdrage van KlimaatAdaptieve Drainage op de reductie in piekafvoer volume, en de overschrijdingskans van de piekafvoer. Als gevolg van klimaatverandering is de verwachting dat door de hogere regenintensiteit met een vaak langere duur, zowel de afvoer zal toenemen in volume, en dat een bepaald afvoer volume vaker overschreden zal worden.

Daarnaast zijn de rekenmodules ook ontwikkeld om te onderzoeken of de negatieve effecten van de te verwachte toenemende droogte in het voorjaar en de zomer als gevolg van klimaatverandering kan worden opgevangen. Hierbij zou Klimaatadaptieve Drainage kunnen worden ingezet om water langer te conserveren.

De hierna te ontwikkelen rekenmodules zullen hierover uitsluitsel geven. De rekenmodules zijn voor elk van de drie proefpercelen afzonderlijk opgezet.

2.2 SWAP-model

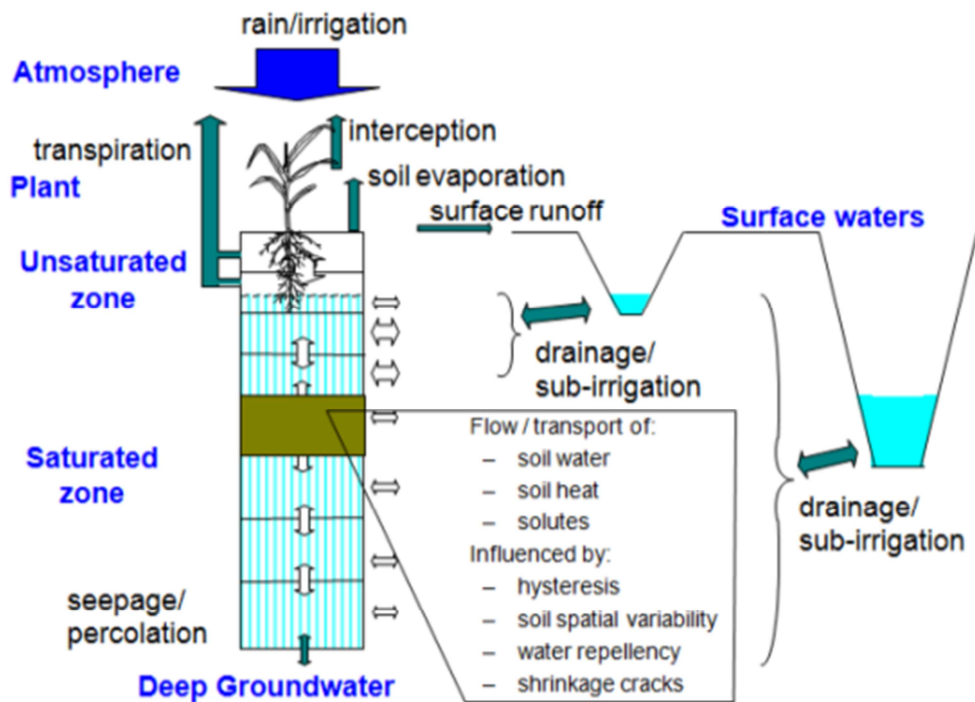
Het Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) model (Van Dam, 2000; Kroes et al., 2008) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. SWAP wordt wereldwijd toegepast bij zowel wetenschappelijk onderzoek als bij adviesbureaus. Het verticale domein van het SWAP model reikt van de atmosfeer net boven de vegetatie tot in het ondiepe grondwater. Het horizontale domein waarop SWAP veelvuldig wordt toegepast is perceelsniveau. SWAP is daardoor bij uitstek geschikt voor het doorrekenen van effecten zoals grondwaterstands en oppervlaktewater veranderingen op de gewasgroei en gewasproductie. SWAP is al eerder toegepast in een studie waar de effecten van conventionele, samengestelde- en peilgestuurde drainage op de nutriëntenbelasting en hydrologie zijn onderzocht (van Bakel et al., 2008) en heeft daarin zijn functionaliteit bewezen. Een gedetailleerde beschrijving van het SWAP model kan gevonden worden in Kroes et al. (2008). Een schematisatie van het SWAP model is weergegeven in

Figuur 1.



SWAP wordt in dit haalbaarheidsonderzoek gebruikt om de volgende redenen:

- SWAP is wereldwijd bekend en er is veel wetenschappelijk onderzoek mee gedaan;
- Het bodemprofiel kan zeer gedetailleerd opgezet worden, waardoor een nauwkeurige benadering van de werkelijkheid gesimuleerd kan worden;
- Effecten van maatregelen (bijvoorbeeld sturen met KlimaatAdaptieve Drainage) kunnen snel en effectief doorgerekend worden;
- Er zijn veel mogelijkheden m.b.t. het opleggen van de randvoorwaarden waarmee gerekend wordt. Het is bijvoorbeeld mogelijk om rekening te houden met kwel en sturing van het regionale oppervlaktewater systeem (winter- en zomerpeil);
- Er kan gerekend worden met verschillende gewastypen, en ook het groeiseizoen kan eenvoudig aangepast worden.



Figuur 1: Schematisatie van het SWAP model (Van Dam, 2000).

3 Opzetten SWAP-modellen

3.1 Invoergegevens

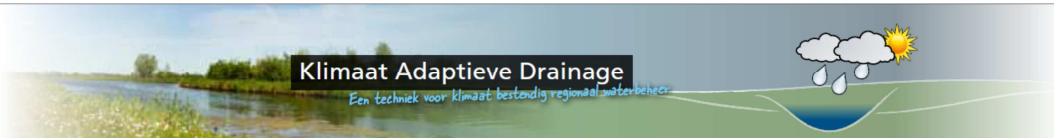
Voor het opzetten van de rekenmodules in SWAP zijn invoergegevens nodig. De volgende invoergegevens zijn hiervoor nodig:

- meteorologie (neerslag, referentie gewasverdamping);
- bodem (bodempysische eigenschappen);
- drainage (drainafstand, draandiepte, drainlengte, sturing KAD);
- vegetatie (gewaseigenschappen, groeiseizoen).

Deze gegevens zijn locatie specifiek en daarom is voor elk van de drie proefpercelen een afzonderlijke set invoergegevens nodig. In de volgende drie paragrafen is per proefperceel een samenvatting gegeven van de invoergegevens.



Figuur 2: Locaties van de drie proefgebieden.



3.1.1 Haaksbergen

Voor de meteorologische gegevens voor Haaksbergen is gebruik gemaakt van het dichtstbijzijnde KNMI-station. Dit is meetstation Hupsel. Dit station levert per dag neerslagdata en de referentiegewasverdamping volgens Makkink.

Door grondslag BV¹ zijn op de locatie Haaksbergen 5 grondboringen verricht. Op basis van de boringen is het bodemprofiel (volgens de Staringreeks (Wösten et al., 2001)) zoals beschreven in Tabel 1 vastgesteld in Haaksbergen. De bijbehorende bodemfysische parameters zijn vastgesteld aan de hand van het Mualem – van Genuchten model (Mualem, 1976). Bepaalde parameters zijn tijdens de kalibratie geoptimaliseerd om de situatie in het veld zo realistisch mogelijk te kunnen simuleren.

Tabel 1: Bodemprofiel met bijbehorende bodemfysische parameters voor proefperceel Haaksbergen.

Bodem laag	Diepte	Staring reeks	Θ_{res}	Θ_{sat}	K_{sat}	α	λ	n
Toplaag	0-40 cm	B1	0.02	0.43	23.41	0.0234	-0	1.801
Ondergrond	40-400 cm	O2	0.02	0.38	12.68	0.0213	0.168	1.951

De drainage in Haaksbergen ligt op een diepte van 1.20 m-mv. De drains hebben een doorsnede van 6 cm en zijn gelegd met een drainafstand van 6 m. De sturing van de KAD-put gebeurt op afstand d.m.v. het TMX-systeem van Kuijpers.

De rekenmodules in SWAP zijn voor Haaksbergen gestart op 1 december 2011. Vanaf deze datum waren de benodigde meetgegevens (grondwaterstanden) uit het veld beschikbaar. Op deze datum was het landgebruik kale grond. De simulatie in SWAP is dus gestart met vegetatietype "bare soil". Vanaf ca. 15 mei wordt er op het perceel mais verbouwd. Dit is ook in SWAP ingebouwd.

3.1.2 Marwijksoord

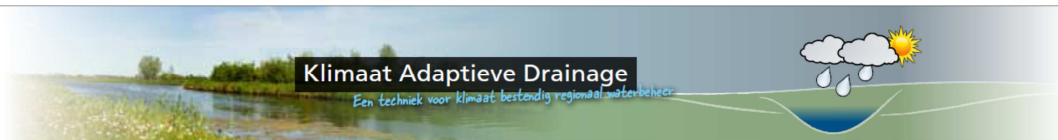
Voor de meteorologische gegevens voor Marwijksoord is gebruik gemaakt van het dichtstbijzijnde KNMI-station. Dit is meetstation Eelde. Dit station levert per dag neerslagdata en de referentiegewasverdamping volgens Makkink.

Door grondslag BV² zijn op de locatie Marwijksoord 3 grondboringen verricht. Op basis van de boringen is het bodemprofiel (volgens de Staringreeks (Wösten et al., 2001)) zoals beschreven in Tabel 2 vastgesteld in Marwijksoord. De bijbehorende bodemfysische parameters zijn vastgesteld aan de hand van het Mualem – Van Genuchten model (Mualem, 1976). Bepaalde parameters zijn tijdens de kalibratie geoptimaliseerd om de situatie in het veld zo realistisch mogelijk te kunnen simuleren. De keileem die voorkomt in Marwijksoord is zo goed mogelijk ingebouwd, maar een verdere verfijning en analyse is nog gewenst.

¹ <http://www.grondslag.nl>

² <http://www.grondslag.nl>





Tabel 2: Bodemprofiel met bijbehorende bodemfysische parameters voor proefperceel Marwijksoord.

Bodem laag	Diepte	Staring reeks	Θ_{res} (cm ³ /cm ³)	Θ_{sat} (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (cm/d)	a	λ	n
Top laag	0-40 cm	B1	0.02	0.43	23.41	0.0234	-0	1.801
Sub laag	40-80 cm	O2	0.02	0.38	12.68	0.0213	0.168	1.951
Sub laag	80-220 cm	O14	0.01	0.38	1.51	0.0030	-	1.728
							0.292	
Sub laag	220-400 cm	O2	0.02	0.38	12.68	0.0213	0.168	1.951

De drainage in Marwijksoord ligt op een diepte van 1.20 m-mv. De drains hebben een doorsnede van 6 cm en zijn gelegd met een drainafstand van 6 m. De sturing van de KAD-put gebeurt op afstand d.m.v. het TMX-systeem van Kuijpers.

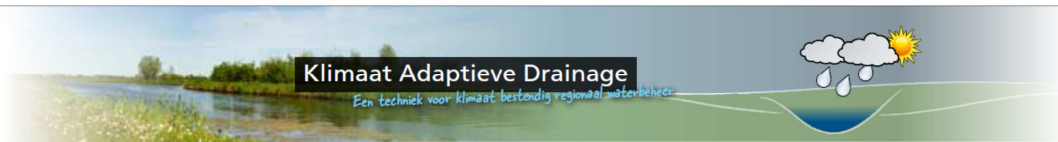
De rekenmodules in SWAP zijn voor Marwijksoord gestart op 1 december 2011. Vanaf deze datum waren de benodigde meetgegevens (grondwaterstanden) uit het veld beschikbaar. Op deze datum was het landgebruik kale grond. De simulatie in SWAP is dus gestart met vegetatietype "bare soil". Vanaf ca. 15 mei worden er op het perceel aardappels verbouwd. Dit is ook in SWAP ingebouwd.

3.1.3 Rijsbergen

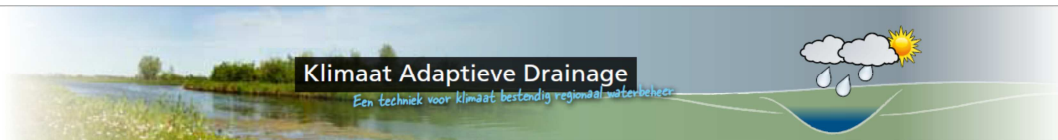
Voor de meteorologische gegevens voor Rijsbergen is gebruik gemaakt van het dichtstbijzijnde KNMI station. Dit is meetstation Gilze-Rijen. Dit station levert per dag neerslagdata en de referentie gewasverdamping volgens Makkink.

Door grondslag BV¹ zijn op de locatie Rijsbergen 4 grondboringen verricht. Op basis van de boringen is het bodemprofiel (volgens de Staringreeks (Wösten et al., 2001)) zoals beschreven in

¹ <http://www.grondslag.nl>



Tabel 3 vastgesteld in Rijsbergen. De bijbehorende bodemfysische parameters zijn vastgesteld aan de hand van het Mualem – van Genuchten model (Mualem, 1976). Bepaalde parameters zijn tijdens de kalibratie geoptimaliseerd om de situatie in het veld zo realistisch mogelijk te kunnen simuleren.



Tabel 3: Bodemprofiel met bijbehorende bodemfysische parameters voor proefperceel Rijsbergen.

Bodem laag	Diepte	Staring reeks	Θ_{res}	Θ_{sat}	K_{sat}	α	λ	n
Top laag	0-50 cm	B1	0.02	0.43	23.41	0.0234	-0	1.801
Sub laag	50-60 cm	O2	0.02	0.38	12.68	0.0213	0.168	1.951
Sub laag	60-80 cm	O14	0.01	0.38	1.51	0.0030	-0.292	1.728
Sub laag	80-290 cm	O2	0.02	0.38	12.68	0.0213	0.168	1.951
Sub laag	290-320 cm	O14	0.01	0.38	1.51	0.0030	-0.292	1.728

De drainage in Rijsbergen ligt op een diepte van 1.20 m-mv. De drains hebben een doorsnede van 6 cm en zijn gelegd met een drainafstand van 6 m. De sturing van de KAD put gebeurt op afstand d.m.v. het TMX-systeem van Kuijpers.

De rekenmodules in SWAP zijn voor Rijsbergen gestart op 5 december 2011. Vanaf deze datum waren de benodigde meetgegevens (grondwaterstanden) uit het veld beschikbaar. Op deze datum was het landgebruik gras. Dit type landgebruik blijft voor Rijsbergen onveranderd tijdens de simulatie periode.

3.2 Kalibratie

Om de rekenmodules geschikt te maken om de bijdrage van Klimaatadaptieve Drainage op de vermindering van piekafvoeren en het conserveren van water te bepalen, is SWAP voor elk van de drie proefpercelen gekalibreerd. Gezien de verlate implementatie van de KAD-systemen in de proefpercelen, was de kalibratieperiode te kort om een voor 100% gekalibreerd SWAP-model te krijgen voor elk van de proefpercelen. De periode was echter wel voldoende lang om het model dusdanig goed gekalibreerd te krijgen dat de bijdrage van Klimaatadaptieve Drainage op de vermindering van piekafvoeren en conserveren van water bepaald kan worden. Hiermee wordt dus voldaan aan de doelstelling van de deelrapportage van werkpakket 2: Rekenmodules (SWAP). De geoptimaliseerde parameters zijn:

- Onderrandvoorwaarde (c-weerstand);
- Drainageweerstand;
- Gemiddelde stijghoogte onderliggend watervoerend pakket;
- Vochtgehalte bodem bij verzadiging (Θ_{sat});

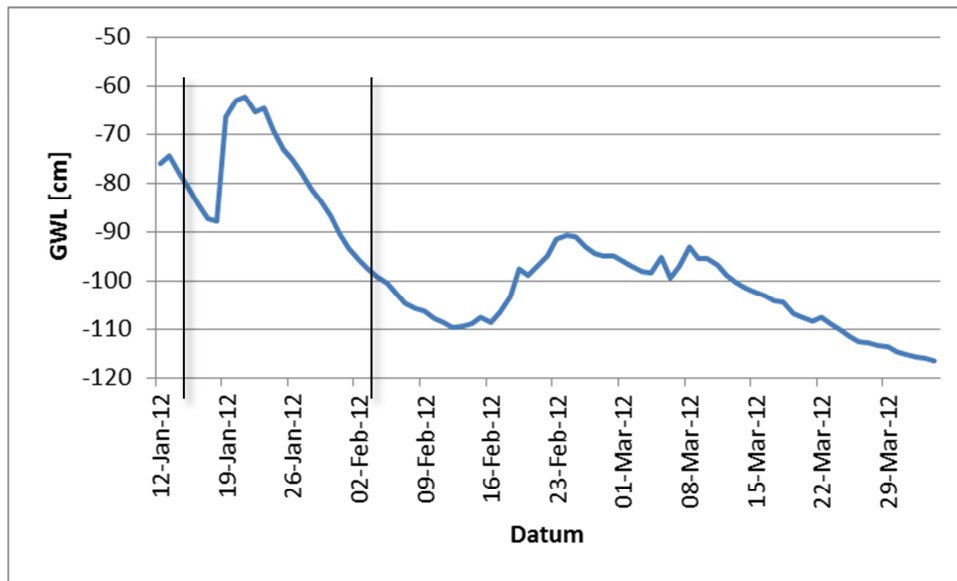
In de volgende drie paragrafen is per locatie een beknopte beschrijving gegeven van de kalibratie van SWAP.

3.2.1 Haaksbergen

Bij de locatie Haaksbergen is sprake van een beek die parallel aan het proefperceel loopt. Deze beek, de Bolscherbeek, kan vertaald worden in het regionale systeem. In SWAP is daarom gekozen voor een onderrand met een flux als functie van de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket. Om de flux naar het regionale systeem te bepalen is de recessie van de



gemeten grondwaterstand gefit tijdens een droge periode. De geselecteerde periode voor de fit is weergegeven in Figuur 3. Door een drainagepeil te kiezen voor het regionale systeem (waar de grondwaterstand naar kan uitzakken), kan de gemeten dH tegen de tijd uitgezet worden. Voor het drainagepeil is 160 cm-mv gekozen omdat dit ca. het winterpeil van de Bolscherbeek is. Daaraan is vervolgens een recessie curve gefit middels: $H = H_0 * \exp(-\alpha*t)$. Daarin is H_0 de initiële dH en t de tijd in dagen. De alfa parameter is gefit aan de gemeten recessie curve en heeft een waarde van 0.029.



Figuur 3: Geselecteerde periode om de flux naar het regionale systeem te bepalen voor Haaksbergen.

Alfa is gedefinieerd als $1/(\mu*c)$, waarin c de weerstand in dagen is die in SWAP opgegeven moet worden. Mu is de bergingscoëfficiënt en is gedefinieerd als: $\mu = dW/dH$. Deze is afgeleid door op 2 dagen deze waarden te bepalen in SWAP waarna vervolgens mu uitgerekend kan worden. De mu die er in eerste instantie uitkwam was 0.164. Daar hoort vervolgens een c-waarde bij van 210 dagen. Het bleek dat in SWAP het bodemvocht niet snel genoeg opgebouwd werd. Daarom is de θ_{sat} met 40% verlaagd. Een reductie van 40% voor θ_{sat} lijkt veel, maar uit nader onderzoek blijken er op de locatie Haaksbergen ploegzolen voor te komen. Hierdoor is een reductie van θ_{sat} aannemelijk. Een reductie van θ_{sat} betekent dat ook de dW met 40% moet afnemen. Om een zelfde alfa te behouden moet de c-waarde daarvoor compenseren. Dit kan bereikt worden door deze met 40% toe te laten nemen. Dit resulteert in een uiteindelijke c-waarde van 294 dagen.

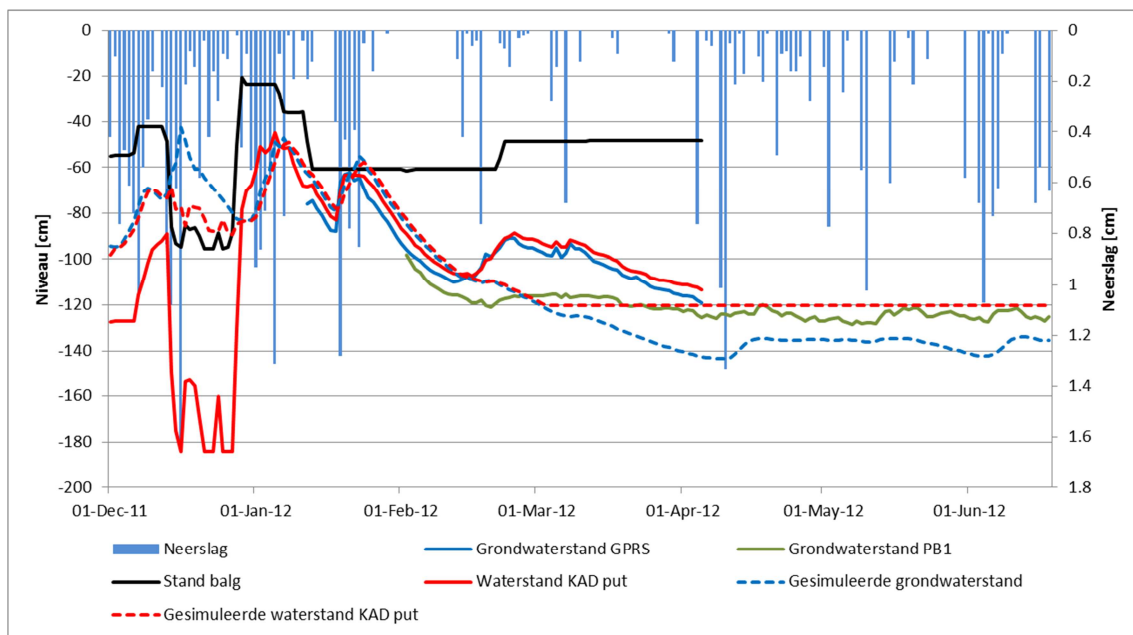
Het uiteindelijk kalibratieresultaat is weergegeven in

Figuur 4.

Op basis van

Figuur 4 kan geconcludeerd worden dat SWAP goed gekalibreerd is voor proefperceel Haaksbergen. Getracht werd om zowel de waterstand in de KAD-put als de gemeten grondwaterstand met SWAP te simuleren. Aan het begin van de simulatie periode valt er relatief

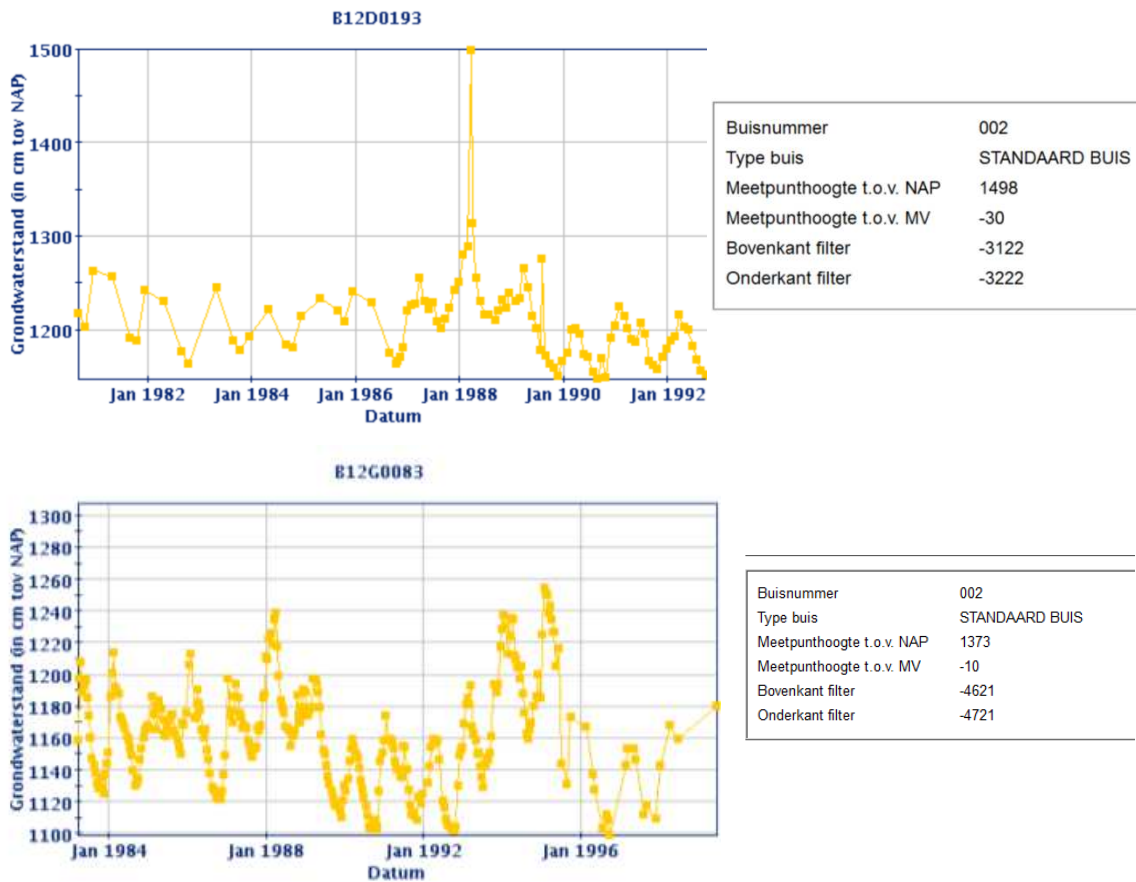
de meeste neerslag. Tijdens deze periode zien we dan ook de meeste fluctuatie in de grondwaterstand en het water in de KAD-put. Tijdens deze periode is SWAP in staat om de gemeten waterstand in de put goed te simuleren. Het dient opgemerkt te worden dat de logger die de waterstand in de put meet van 14 december t/m 29 december fout gelogd heeft. Dit is duidelijk terug te zien in onderstaand Figuur 4 wanneer het waterpeil ver beneden de stand van de balg zit. Tijdens de recessie, de periode waarop de weerstand van het regionale systeem bepaald is, simuleert SWAP de grondwaterstand bijna perfect aan de gemeten grondwaterstand. Eind februari laten de gemeten grondwaterstand en het water in de put een stijging zien. SWAP simuleert dit onvoldoende. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de bui in werkelijkheid intenser was dan gemeten bij station Hupsel.



Figuur 4: Kalibratie resultaten van proefperceel Haaksbergen.

3.2.2 Marwijksoord

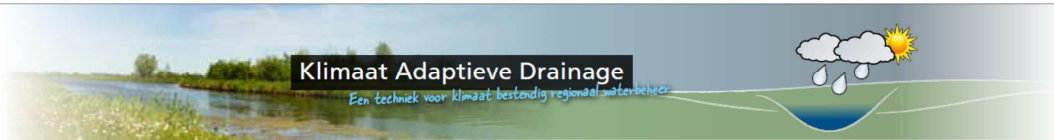
Uit analyse van de grondboringen kwam naar voren dat er in Marwijksoord sprake is van een keileemlaag die begint op ca. 100 cm-mv. Door deze keileemlaag wordt de flux naar het diepere grondwater beperkt. Om deze reden is er voor gekozen om een onderrand op te leggen met een flux van 0.5 mm/d naar beneden. Hierdoor sijpelt er toch enigszins wat water naar het diepere grondwater. Deze onderrand is verantwoord omdat uit analyse van TNO-peilbuizen (Figuur 5) is gebleken dat het grondwater onder de keileemlaag nabij deze locatie erg diep zit en nooit boven de keileemlaag komt. Ook uit de analyse van onze veldmetingen is gebleken dat het grondwater onder de keileemlaag blijft en fluctueert tussen de 250 en 350 cm-mv (Figuur 6).



Figuur 5: Grondwaterstandsverloop nabij locatie Marwijksoord. Data is afkomstig van TNO peilbuisnummers B12D0193 en B12G0083.

Omdat er sprake is van een keileemlaag, treedt er in Marwijksoord een schijngrondwaterstand op. Er is echter geen ondiepe peilbuis geplaatst om deze schijngrondwaterstand te meten. Hierdoor was een kalibratie aan de hand van een gemeten grondwaterstand niet mogelijk. Wel was het mogelijk om te valideren of de grondwaterstand boven de keileemlaag gesimuleerd wordt. De SWAP simulatieresultaten zijn weergegeven in Figuur 6. Hieruit blijkt dat zowel de gesimuleerde grondwaterstand als het water in de put boven de keileemlaag goed gesimuleerd worden. Evenals bij Haaksbergen heeft de logger die het water in de put meet een aantal foute metingen gedaan rond 25 december 2011 en 15 januari 2012. Verder blijkt er een gat in de waarnemingen te zitten. Dit is gerelateerd aan het feit dat het TMX-systeem gemigreerd is tijdens de simulatieperiode, waardoor een deel van de meetgegevens ontbreken. Om de bijdrage van Klimaatadaptieve Drainage aan de vermindering van piekafvoeren te onderzoeken is SWAP voor Marwijksoord niet optimaal gekalibreerd vanwege de afwezigheid van een ondiepe peilbuis. Wel is de rekenmodule dusdanig geschikt om een uitspraak te kunnen doen over de bijdrage van KAD aan de vermindering van piekafvoeren en wateraanvoerbehoefte als gevolg van klimaatverandering.

De situatie bij Marwijksoord blijft complex en een nadere inspectie en expert knowledge heeft tot de volgende conclusies geleid. Nadere analyse van de geohydrologische situatie, het na de

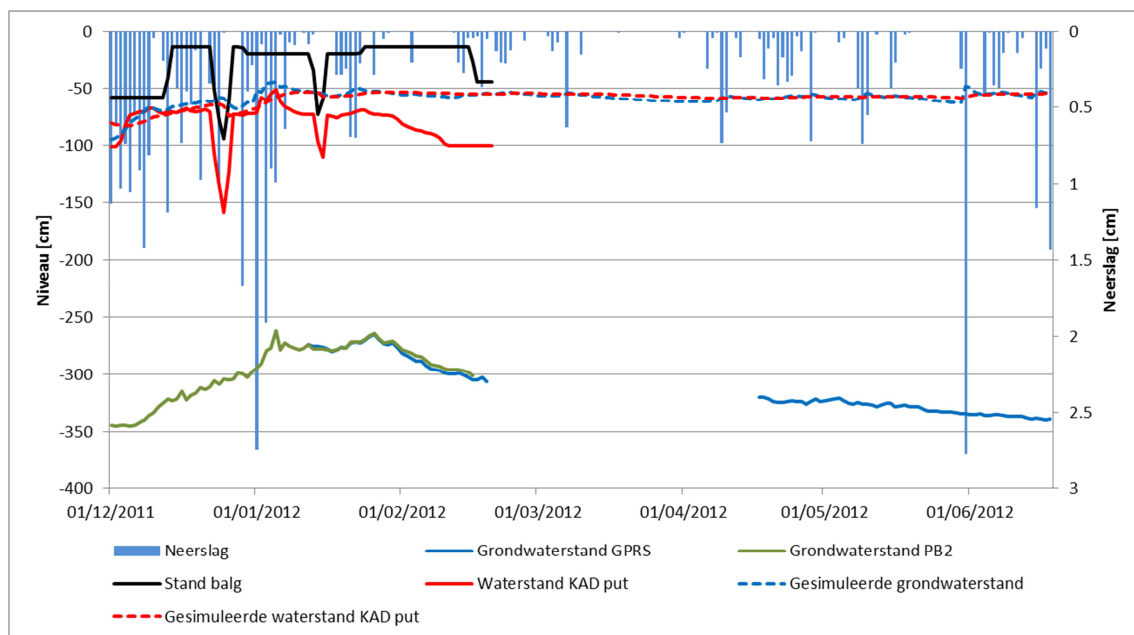


aanleg geraadpleegde RIVM-rapport betreffende dikte en verbreding van de keileem van het proefbedrijf Kooyenburg Fraters en Van Vilsteren, 1991) en ervaringen met subinfiltratie in de zomer van 2012 heeft geleid tot het volgende schets van deze proeflocatie.

Bij de aanleg van de klimaatadaptieve drainage werd op basis van de aanwezigheid van drainage en water in de sloten er van uitgegaan dat er regelmatig water via de nieuw aan te leggen drains zou worden afgevoerd. En dat dus peilsturing mogelijk is. Bovendien was er vanuit de bedrijfsleiding van Marwijksoord de wens dat in de zomer water via de drains kon worden geïnfiltreerd ten behoeve van de vochtvoorziening van de landbouwgewassen en de verwachting was dat dit goed mogelijk zou zijn.

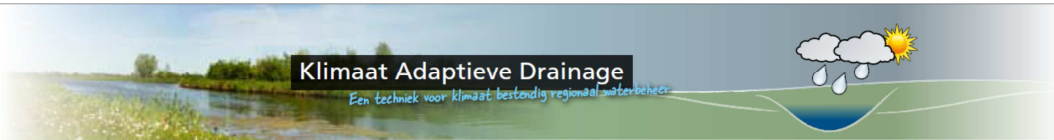
Bij de aanleg zijn veel drains in de keileem gelegd, zoals visueel is vast te stellen doordat met de kettinggraver keileem naar boven is gebracht. Of bij de aanleg de keileem op plaatsen (vrijwel) is doorgegraven is niet aan te geven maar op basis van het uitgevoerd bodemonderzoek bestaat die kans wel. Feit is dat er in de winter van 2011/2012 nauwelijks afvoer is opgetreden en dat bij video-inspectie van de nieuw aangelegde drains waarneembaar was dat er in delen van de drains geen water door de drains was gestroomd.

In de zomer van 2012 is gedurende een bepaalde periode water via de drains geïnfiltreerd. Dit leidde niet tot een verhoging van de grondwaterstand op de meetlocatie. Dit zijn duidelijke aanwijzingen dat het aangevoerde water door de keileemlaag weglekt naar de ondergrond.



Figuur 6: Kalibratie resultaten van proefperceel Marwijksoord.

De stijghoogte van het grondwater onder de keileemlaag is zodanig laag dat bij geringe weerstand van de keileemlaag (al dan niet door de aanleg van de drains veroorzaakt) er geen schijngrondwaterstanden (meer) optreden. In die delen waar dat de keileemlaag een hoge



weerstand heeft kan er is kan in perioden met hoge waarden van grondwateraanvulling wel schijngrondwaterstanden optreden. Bij conventionele drainage is de kans groot dat dit leidt tot afvoer via de drain ook al omdat nauwelijks overdruk in de drains wordt opgebouwd (vrije uitstroming; free drainage). Bij samengestelde drains zijn alle drains met elkaar verbonden en dus is de kans aanmerkelijk groter dat er kortsluiting optreedt, ook wel aangeduid als redistributie. Een belangrijke oorzaak is ook dat de drainagebasis zo'n 30 cm hoger is dan de hoogteligging van de drains. Dit heeft tot gevolg dat er meer overdruk is met meer wegzijging tot gevolg. In combinatie wordt door samengestelde drainage met een relatief hoge drainagebasis een optimaal werkend systeem voor vermindering van de afvoer via de drains gecreëerd. Voor de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten via drainafvoeren en voor de regionale grondwateraanvulling een zegen maar voor de doelstelling van het project (het uittesten van en het demonstreren van de potenties van op afstand regelbare drainage) niet bepaald gunstig.

Voor de monitoring heeft bovenstaande analyse de volgende consequenties:

- Analyse van de ruimtelijke verbreiding van de keileem en bijbehorende diktes
- Plaatsing van meerdere filters boven de keileemlaag met als doel de dynamiek in ruimte en tijd van het optreden van schijngrondwaterstanden in beeld te krijgen
- Uitvoeren van subinfiltratieproeven waarbij de aanvoer naar en afvoer vanuit het samengestelde drainagesystemen en waterstanden in de KAD-put en de grondwaterstanden in de meetpunten continu worden gemeten.

Voor de modellering met SWAP heeft bovenstaande analyse de volgende consequenties:

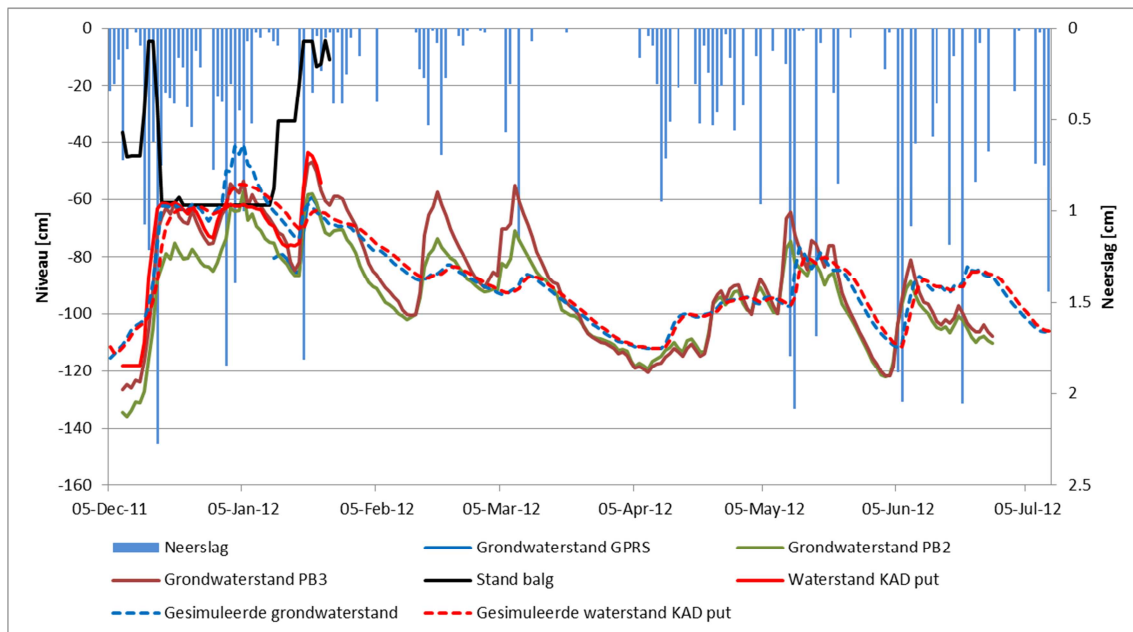
- De onderrandvoorwaarden is het beste te schematiseren als een relatie tussen grondwaterstand en afvoer naar regionaal systeem (de beken) waarbij de weerstand en regionale ontwateringsbasis kunnen worden afgeleid uit analyse van het uitzakkingsverloop van de grondwaterstanden beneden de keileemlaag.
- Met de code SWAP kunnen schijngrondwaterstanden worden uitgerekend. Daarvoor is wel noodzakelijk dat de verzadigde doorlatendheid van de keileemlaag zeer laag is (minder dan 3 mm/d, zijnde bij benadering de neerwaartse stroming ongeveer op GHG-moment).
- Gezien de ruimtelijke variabiliteit in dikte en weerstand van de keileemlaag zijn meerdere SWAP-modellen noodzakelijk.
- De redistributie is met het eendimensionale code SWAP niet te modelleren. Echter het is wel mogelijk de afvoer van modellen met hoge weerstand van de keileemlaag (en dus tijdelijk schijngrondwaterstanden) als aanvoer te zetten op modellen waar geen schijngrondwaterstanden optreden.
- Als het saldo van afvoer en infiltratie vrijwel nooit positief is, is er ook geen afvoer via de KAD-put en is sturing van de drainagebasis niet mogelijk.

3.2.3 Rijsbergen

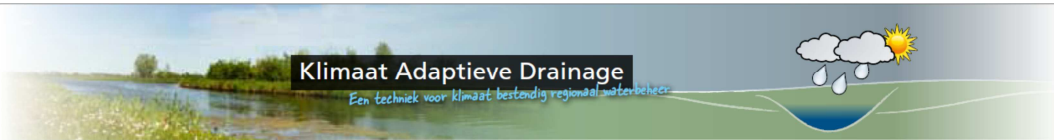
Rijsbergen is op een vergelijkbare wijze als Haaksbergen gekalibreerd. Vanwege de afwezigheid van een keileemlaag is wederom gebruik gemaakt van de onderrandvoorwaarde waarin de flux naar het regionale systeem een functie is van de

stijghoogte in het diepe watervoerende pakket. Dit resulteerde in een c-waarde van 100 dagen. Dit is een lagere weerstand dan de weerstand die bepaald is voor Haaksbergen (c = 294 dagen). Hierdoor zal het grondwater in Rijsbergen sneller uitzakken dan in Haaksbergen. Dit blijkt ook wanneer

Figuur 4 vergeleken wordt met Figuur 7, waarin de kalibratieresultaten van Rijsbergen zijn weergegeven. Op basis van deze resultaten mag het duidelijk zijn dat SWAP voor Rijsbergen goed gekalibreerd is. De gesimuleerde grondwaterstand komt goed overeen met de gemeten grondwaterstand. Ook voor Rijsbergen blijken veel metingen te ontbreken door de migratie van het TMX-systeem. Hierdoor is het alleen aan het begin van de simulatieperiode mogelijk om de gemeten waterstand in de put te vergelijken met de gesimuleerde waterstand in de put. Tijdens deze periode komt de gesimuleerde waterstand in de put goed overeen met de gemeten waterstand in de put. Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de rekenmodule voor Rijsbergen geschikt is om de bijdrage van KAD aan de vermindering van piekafvoeren en wateraanvoerbehoefte als gevolg van klimaatverandering te onderzoeken.



Figuur 7: Kalibratie resultaten van proefperceel Rijsbergen.



4 Klimaatveranderingen

4.1 KNMI-klimaatscenario's

In 2006 zijn door het KNMI-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 zogenoemde Droogtestudie. De nieuwe KNMI'06 klimaatscenario's zijn gebaseerd op de resultaten van "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. In 2013 verwacht het KNMI de zogenoemde KNMI-Next scenario's uit te brengen, maar resultaten hiervan zijn nog niet bekend.

De temperatuurstijgingen vormen en het uitgangspunt voor de Gematigde (G) en Warme (W) klimaatscenario's (Figuur 8 en Figuur 9). 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 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.

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

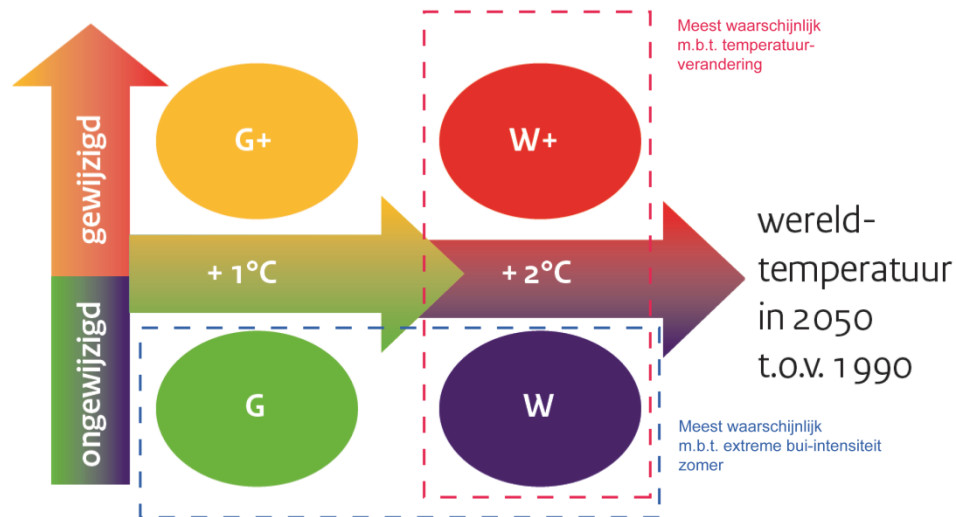
Tabel 4 en Tabel 5 is de klimaatverandering rond 2050 uitgedrukt in cijfers per KNMI'06 scenario. Voor meer achtergronden over de KNMI scenario's wordt verwezen naar Van den Hurk et al. (2006) en Klein Tank en Lenderink (2009).

De KNMI-scenario's zijn stuk voor stuk aannemelijk. In 2009 heeft het KNMI echter een aantal aanwijzingen voor gebruik gegeven. De meest relevante voor deze studie zijn:

- De lagere temperatuurveranderingen in de G/G+ scenario's minder waarschijnlijk zijn dan de hogere temperatuurveranderingen in de W/W+ scenario's
- De toename van de intensiteit van zware buien in de zomer bij stijgende temperatuur sterker is dan de toename van de extreme dagelijkse hoeveelheden die worden gegeven in de KNMI'06 scenario's
- De veranderingen in (extreme) neerslag in de zomer in de G+/W+ scenario's lijken te laag voor de kuststrook.

Op grond van bovenstaande is besloten om de rekenmodules (SWAP) voor de drie proefpercelen op te zetten voor (i) de huidige situatie, (ii) 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Om de variabiliteit van nu en in de toekomst mee te nemen is steeds met een periode van 30 jaar gerekend.

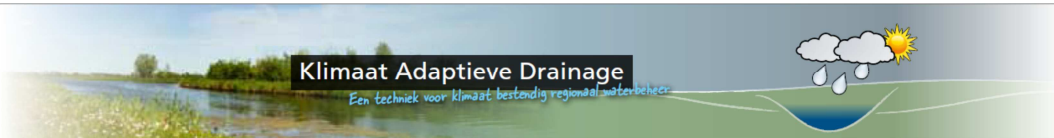
luchtstromings- patronen



Figuur 8. Overzicht KNMI '06 klimaatscenario's met daarin aangegeven de meest waarschijnlijke scenario's voor verschillende processen zoals aangegeven in rapport aanvullingen KNMI '06 scenario's.

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 9. Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaatscenario's.



Tabel 4. 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%

Tabel 5. Gemiddelde procentuele verandering in potentiële verdamping per maand voor het klimaat rond 2050 ten opzichte van het klimaat rond 1990 voor de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's. (Bron: http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/PotET.pdf).

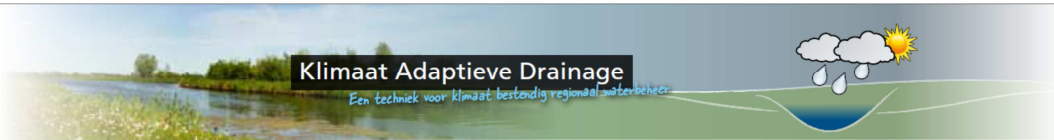
	G	G+	W	W+
Januari	1,4	1,3	2,8	2,6
Februari	1,5	1,5	3,1	3,0
Maart	1,8	2,2	3,7	4,5
April	2,5	3,6	4,9	7,1
Mei	3,0	5,0	6,0	10,1
Juni	3,4	6,5	6,7	13,0
Juli	3,5	7,8	7,0	15,7
Augustus	3,4	8,5	6,7	16,9
September	3,0	7,6	6,0	15,2
Oktober	2,4	5,0	4,7	10,1
November	1,8	2,9	3,6	5,8
December	1,5	1,7	3,1	3,4

4.2 Klimaatjreeksen

Het KNMI heeft een transformatieprogramma beschikbaar om huidige tijdsreeksen om te zetten naar verwachting voor de toekomst. Het programma is te gebruiken via http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/

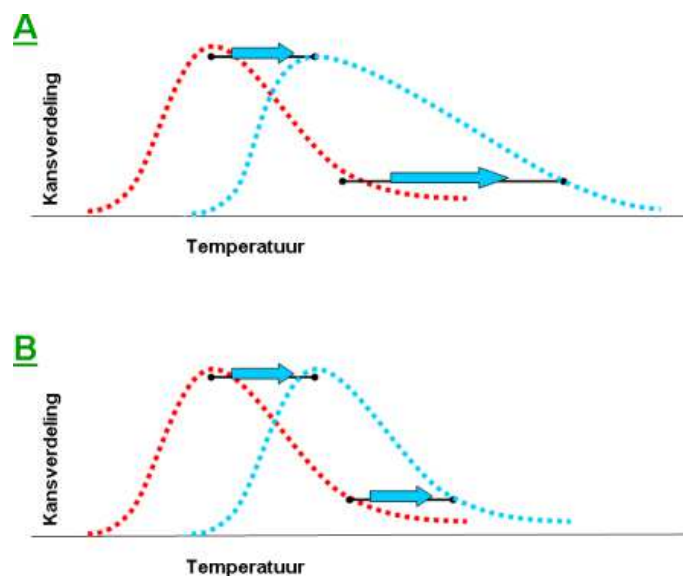
Het doel van het transformatie-programma is om historische neerslag- of temperatuurreeks op dag basis om te zetten in een reeks die past bij het toekomstige klimaat onder één van de vier





KNMI'06 klimaatscenario's voor een gekozen tijdshorizon. Met andere woorden: het transformatieprogramma past de verandering van de gemiddelden en de variabiliteit, zoals voorgeschreven door het gekozen KNMI'06 scenario voor een bepaalde tijdshorizon toe op een gegeven historische reeks van temperatuur of neerslag.

De getransformeerde tijdreeksen geven informatie over de gemiddelden, variatie tussen dagen, kans op extremen, etc. voor het mogelijke klimaat in de toekomst. De KNMI'06 scenario's geven aan dat de verandering in de gemiddelden vaak anders is dan de verandering in extreme waarden. Het transformatie-programma houdt hier rekening mee, en zorgt ervoor dat dit tot uiting komt in de tijdreeksen voor de toekomst (Figuur 10).



Figuur 10. Schematische voorstelling van de verandering van een temperatuurverdeling door de transformatie. Bij A verandert de mediaan anders dan de extremen, en bij B is de verandering in de mediaan gelijk aan de verandering in de extreme waarden. (Bron: http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/transtoeilichting.cgi)

Neerslag gegevens zijn standaard beschikbaar voor de volgende stations (Figuur 11):

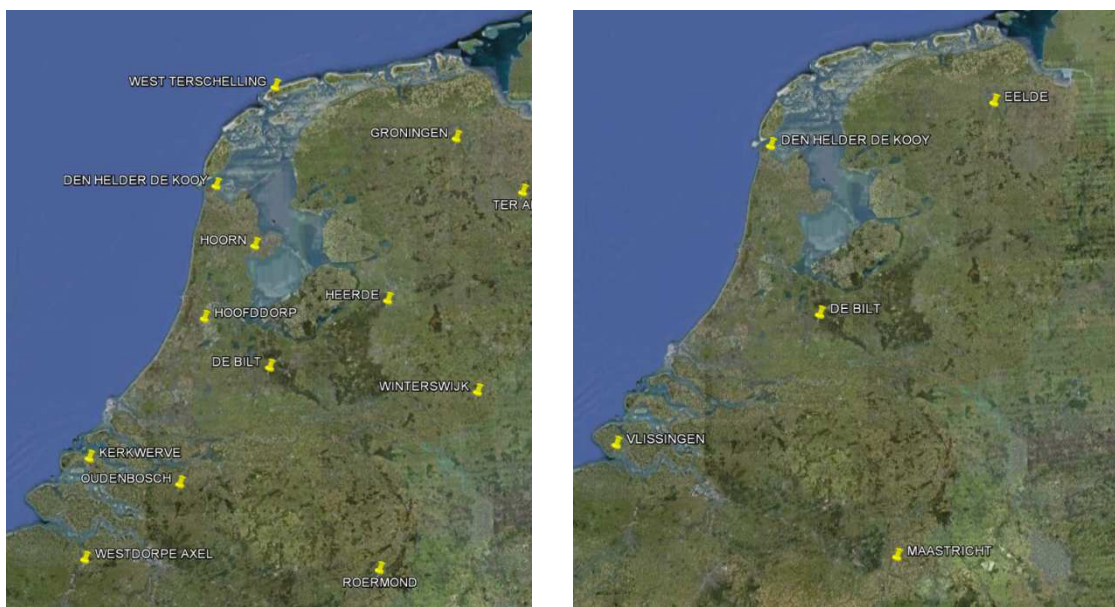
- West-Terschelling
- De Kooy/Den Helder
- Groningen
- Ter Apel
- Hoorn
- Heerde
- Hoofddorp
- De Bilt
- Winterswijk
- Kerkwerpe



- Westdorpe/Axel
- Oudenbosch
- Roermond

Voor temperatuur zijn de volgende stations standaard beschikbaar (Figuur 11):

- De Kooy/Den Helder
- Groningen/Eelde
- De Bilt
- Vlissingen
- Maastricht



Figuur 11. Neerslagstations (links) en temperatuurstations (rechts) standaard beschikbaar in het KNMI transformatie programma.

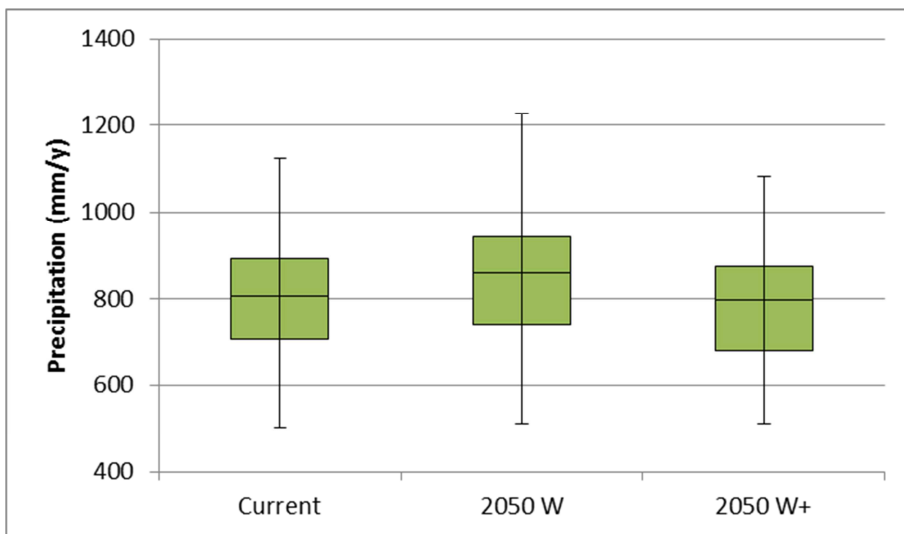
4.3 Haaksbergen

Voor Haaksbergen zijn de stations Winterswijk (neerslag) en De Bilt (referentie verdamping) gebruikt. Hoewel deze stations wat verder af liggen dan het station Hupsel dat gebruikt is voor validatie en kalibratie zal dit geen probleem leveren voor de analyses van de mogelijkheden die KAD biedt voor het verminderen van piekafvoeren en water aanvoer behoefte. De referentie periode (30 jaar rond 1990) en de te verwachte toekomstige situatie onder klimaatverandering (30 jaar rond 2050) zijn gebaseerd op dezelfde twee stations.

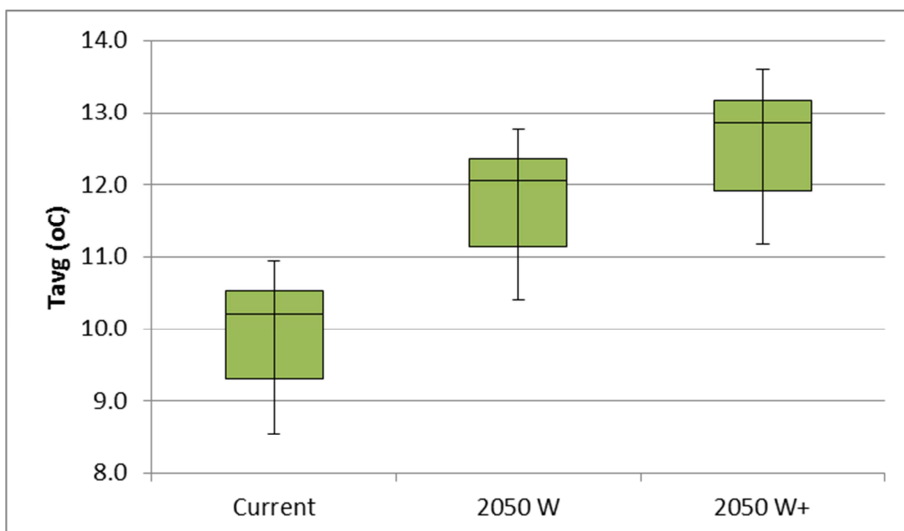
In Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14 zijn de effecten van klimaatverandering te zien op de neerslag, temperatuur en referentieverdamping. De neerslag neemt toe van gemiddeld 799 mm per jaar naar 850 mm per jaar onder het W scenario in 2050 (ongeveer 6%). Voor de referentieverdamping neemt dit toe van 548 mm per jaar tot 613 mm per jaar onder het W+ scenario (toename van 12%).

Naast deze jaarlijkse veranderingen zijn er ook duidelijk trends in dagelijkse extremen en seizoenverschuivingen. Tabel 6 laat de overschrijdingskansen voor dagelijkse neerslag zien, waaruit duidelijk blijkt dat meer extreme buien zijn te verwachten. Uiteraard zullen deze extremere buien zorgen voor meer piekafvoeren indien geen maatregelen worden genomen.

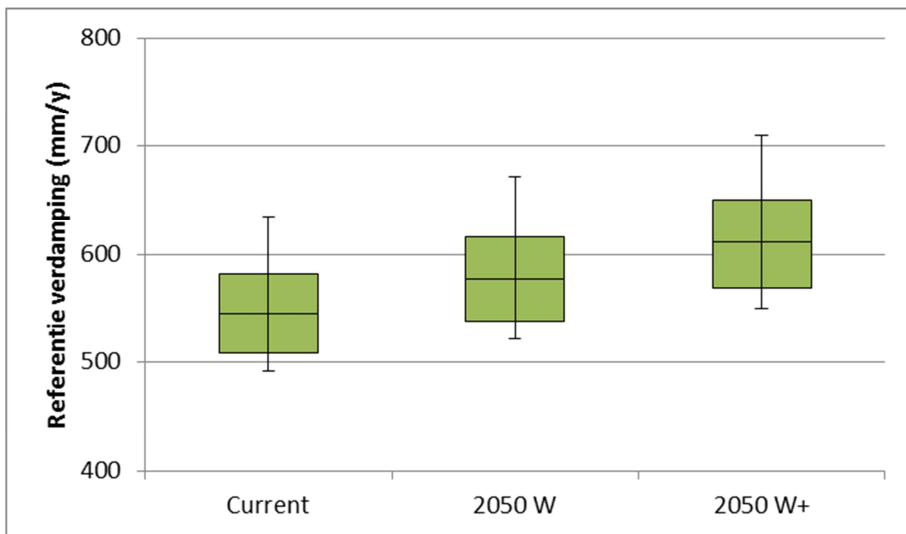
Ook de temperatuur en de referentieverdamping stijgen in de zomer meer dan in andere seizoenen, vooral onder het W+ scenario (Figuur 16 en Figuur 17). Zonder extra maatregelen zal dit leiden tot meer droogte en daardoor verminderde gewasopbrengsten.



Figuur 12. Jaarlijkse neerslag en variatie voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Winterswijk.



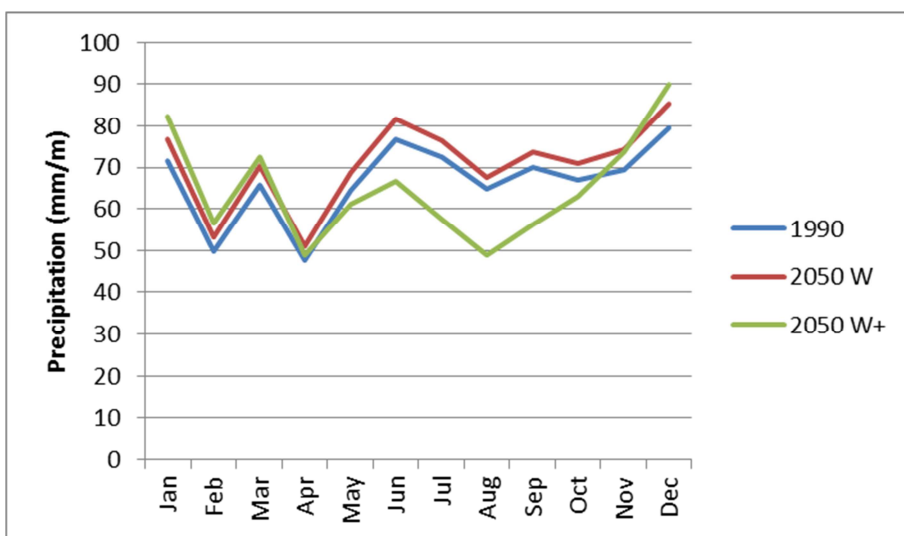
Figuur 13. Jaarlijkse gemiddelde temperatuur en variatie voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: De Bilt.



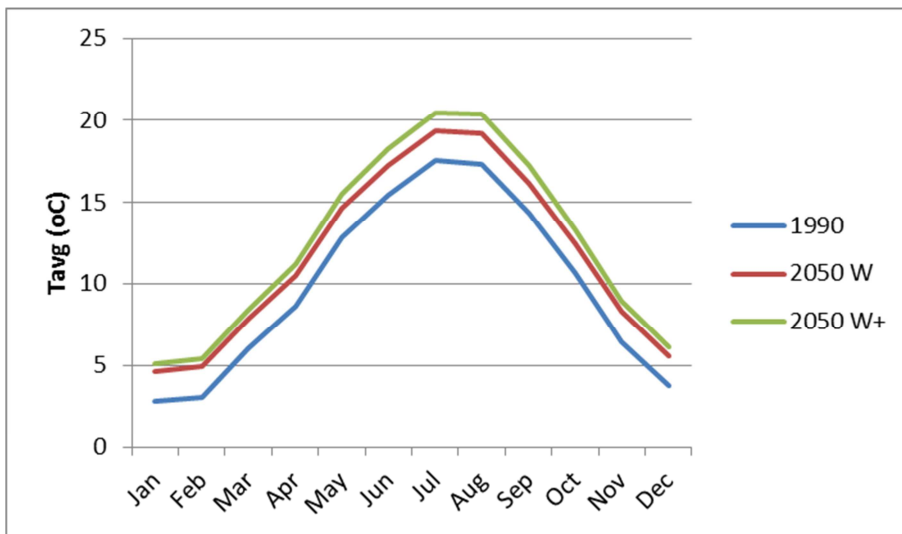
Figuur 14. Jaarlijkse gemiddelde referentiegewasverdamping (Makkink) en variatie voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: De Bilt.

Tabel 6. Overschrijdingskansen van dagelijkse neerslag over een periode van 30 jaar. Station: Winterswijk.

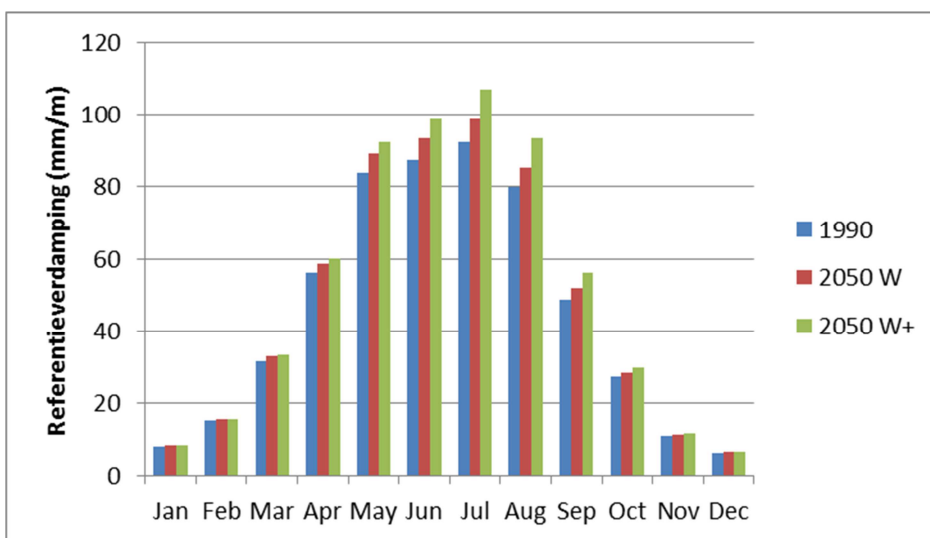
Neerslag (mm/d)	1990	2050 W	2050 W+
>50	2	6	2
>40	8	21	13
>30	29	53	38
>20	114	169	138



Figuur 15. Maandelijkse neerslag voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Winterswijk.



Figuur 16. Gemiddelde maandelijkse temperatuur voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: De Bilt



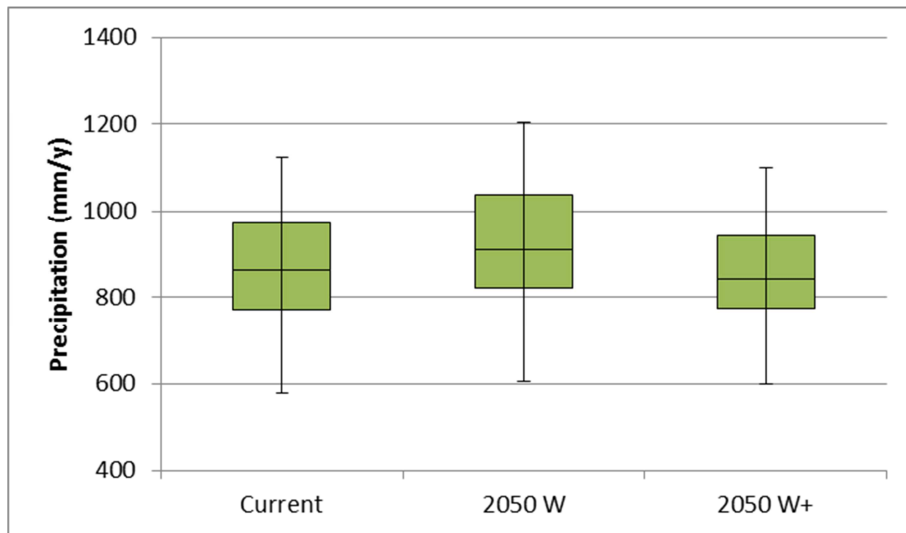
Figuur 17. Gemiddelde maandelijkse referentiegewasverdamping (Makkink) voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: De Bilt

4.4 Marwijksoord

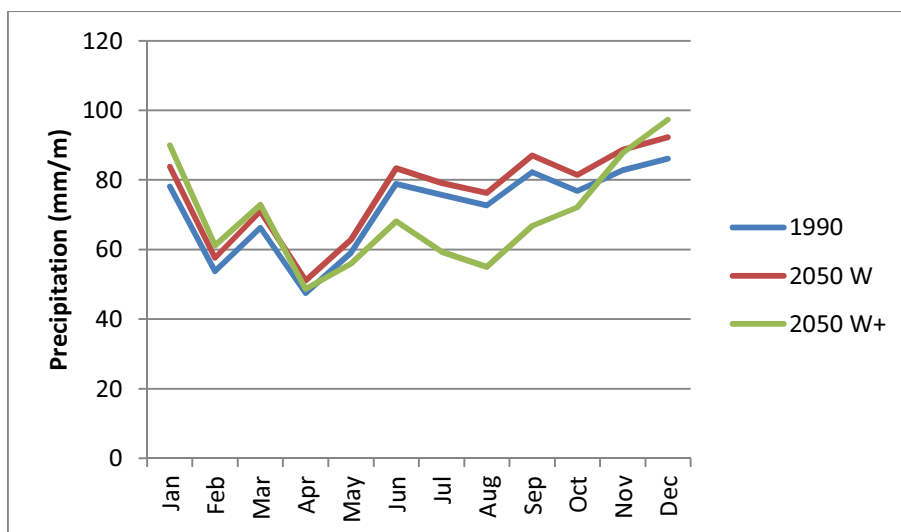
Voor Marwijksoord zijn de stations Groningen (neerslag) en De Bilt (referentie verdamping) gebruikt. De referentie periode (30 jaar rond 1990) en de te verwachte toekomstige situatie onder klimaatverandering (30 jaar rond 2050) zijn gebaseerd op dezelfde twee stations.

In Figuur 18 en Figuur 19 zijn de effecten van klimaatverandering te zien. De neerslag neemt toe van gemiddeld 860 mm per jaar naar 915 mm per jaar onder het W scenario in 2050

(ongeveer 6%). Naast deze jaarlijkse veranderingen zijn er ook duidelijk trends in dagelijkse extremen en seizoenverschuivingen. Uiteraard zullen deze extremere buien zorgen voor meer piekafvoeren indien geen maatregelen worden genomen. Ook de temperatuur en de referentieverdamping stijgen in de zomer meer dan in andere seizoenen, vooral onder het W+ scenario. Zonder extra maatregelen zal dit leiden tot meer droogte en daardoor verminderde gewasopbrengsten.



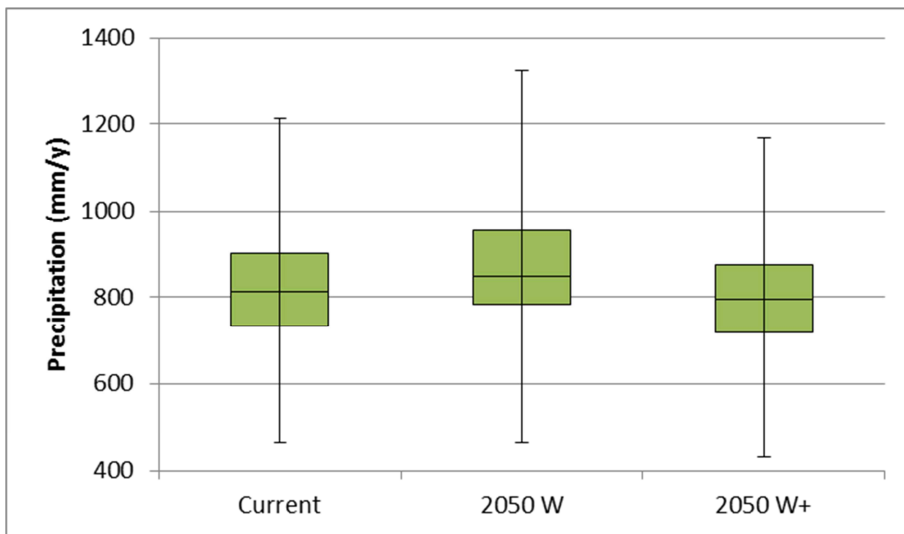
Figuur 18. Jaarlijkse neerslag en variatie voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Groningen.



Figuur 19. Maandelijkse neerslag voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Groningen.

4.5 Rijsbergen

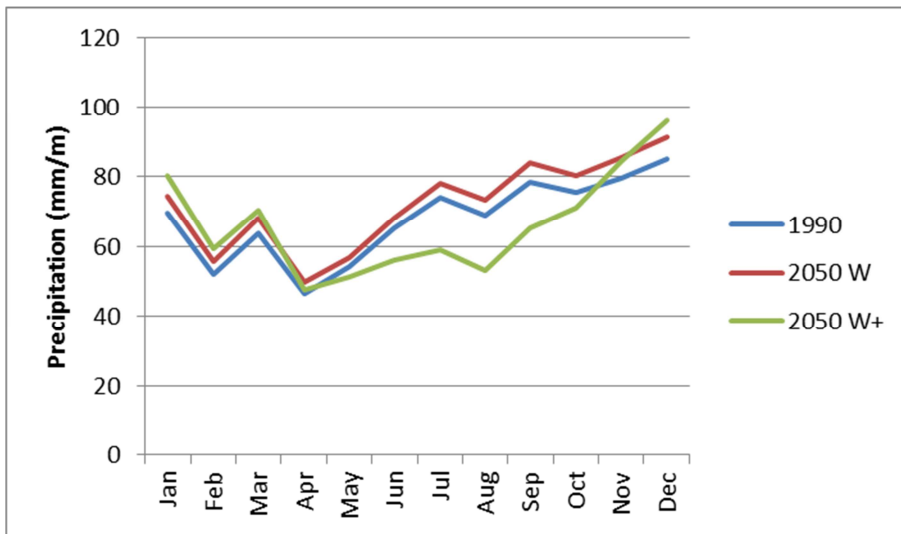
Voor Rijsbergen zijn de stations Vlissingen (neerslag) en De Bilt (referentie verdamping) gebruikt. Hoewel deze stations wat verder af liggen dan het station Gilze-Rijen dat gebruikt is voor validatie en kalibratie zal dit geen probleem leveren voor de analyses van de mogelijkheden die KAD biedt voor het verminderen van piekafvoeren en water aanvoer behoefte. De referentie periode (30 jaar rond 1990) en de te verwachte toekomstige situatie onder klimaatverandering (30 jaar rond 2050) zijn gebaseerd op dezelfde twee stations.



Figuur 20. Jaarlijkse neerslag en variatie voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Oudenbosch.

Tabel 7. Overschrijdingskansen van dagelijkse neerslag over een periode van 30 jaar. Station: Oudenbosch.

Neerslag (mm/d)	1990	2050 W	2050 W+
>50	2	7	4
>40	9	15	12
>30	24	39	32
>20	114	164	134



Figuur 21. Maandelijkse neerslag voor een periode van 30 jaar rond 1990, 2050 W scenario en 2050 W+ scenario. Station: Oudenbosch.



5 Reductie piekafvoeren

5.1 Haaksbergen

Het gekalibreerde en gevalideerde SWAP model zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, is gebruikt voor het analyseren van de invloed van klimaatverandering op piekafvoeren. Er zijn hiertoe de volgende simulaties uitgevoerd:

- Zonder KAD sturing
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W+ klimaatscenario (=droog)
- Met sturing via KAD
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)

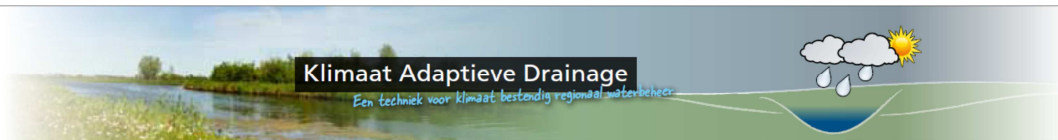
In Tabel 8 is te zien wat de overschrijdingskansen van afvoeren zijn onder de huidige situatie en onder de twee klimaatscenario's. Het is duidelijk dat indien er geen maatregelen worden genomen de te verwachte piekafvoeren flink zullen toenemen in de toekomst. Zelfs onder het "droge" W+ scenario zullen piekafvoeren iets toenemen in vergelijking met de huidige situatie.

Om deze piekafvoeren in de toekomst op te vangen zou KAD kunnen worden ingezet. In deze studie is er voor gekozen om een standaard sturing toe te passen die bestaat uit:

- 7 dagen voor de te verwachte neerslagevent de buffercapaciteit te vergroten door de KAD put naar het laagste niveau te verplaatsen
- 1 dag voor het neerslagevent de KAD put op een zeer hoog niveau te zetten
- 5 dagen na het event de KAD put weer op het reguliere niveau te plaatsen in stappen van 10 cm per dag.

Voor Haaksbergen is ervan uitgegaan dat het reguliere niveau 80 cm beneden maaiveld is. Als laagste niveau is 120 cm en als hoogste 20 cm beneden maaiveld gekozen. Uiteraard zijn er vele varianten op deze standaard piekafvoer reductie strategie te bedenken. Vooral nog is voor alle events die een hogere piekafvoer van 10 mm per dag zouden genereren onder het W scenario deze strategie toegepast. In totaal gaat het om 12 events.

Het resultaat van deze sturing is te zien in Tabel 9. Deze herhalingstijden zijn gegenereerd door een Weibull fitting met een "Peak Over Threshold" aanpak. Het blijkt dus mogelijk te zijn om met een standaard sturing de afvoer met een $T = 10$ jaar terug te brengen van 13 naar 10 mm per dag. Bij een $T = 50$ jaar zelfs van 21 naar 13 mm per dag. Met name de zeer extreme buien ($T = 100$ en hoger) is de vermindering door KAD zeer groot. Er moet wel opgemerkt worden dat de voorspellingen van deze zeer extreme neerslagen minder betrouwbaar zijn omdat een periode van 30 jaar is doorgerekend.



Tabel 8. Herhalingstijden afvoeren (in mm/d) zonder KAD sturing voor de huidige situatie en onder klimaatverandering.

T (jaar)	Current =====	2050W (mm/dag)	2050W+ =====
1	5	6	6
10	10	13	11
25	14	17	15
50	17	21	18
100	22	26	22
500	37	44	36
1000	46	54	44

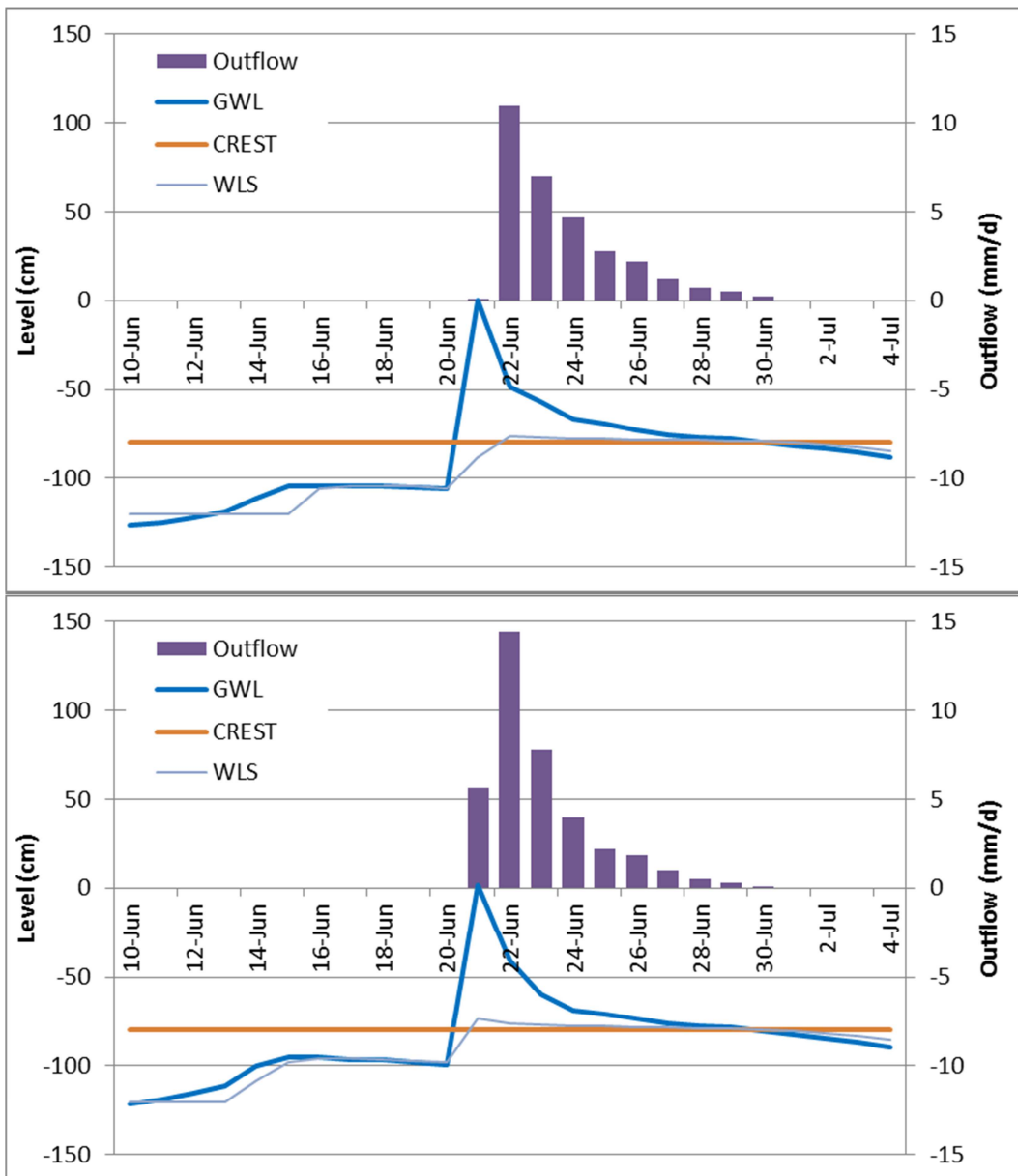
Tabel 9. Herhalingstijden afvoeren (in mm/dag) voor het 2050W scenario zonder en met KAD sturing.

T (jaar)	Zonder KAD =====	Met KAD =====
1	6	6
10	13	10
25	17	11
50	21	13
100	26	15
500	44	20
1000	54	23

Een aantal van deze event is meer in detail bestudeerd:

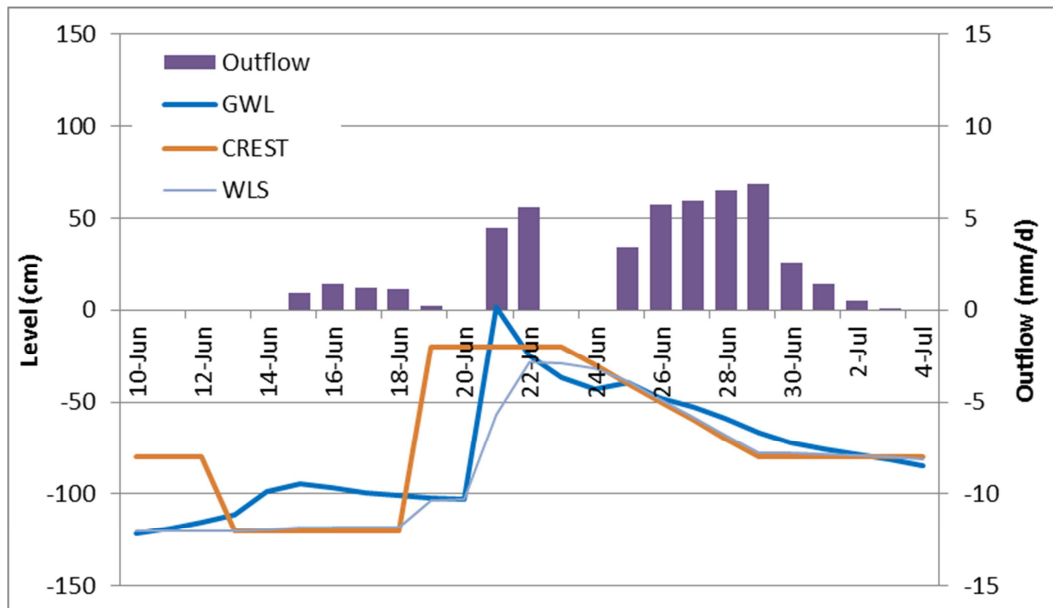
- 21-jun-1985: zomer, zeer extreme bui
- 7-feb-1984: winter, extreme bui
- 21-jul-1980: zomer, extreme bui

De meest extreme bui die een piekafvoer van bijna 15 mm op een dag veroorzaakt vond plaats op 21-jun-1985. Op deze dag viel 76 mm neerslag. Het KNMI transformatieprogramma voorspelt dat deze bui onder het 2050W scenario 95 mm zou bedragen. Het dagelijkse verloop van de afvoer en de sturing is te zien in Figuur 22 (huidig en toekomst zonder sturing) en Figuur 23 (toekomst met sturing). De dagelijkse piekafvoer neemt toe van ongeveer 10 mm tot 15 mm onder klimaatverandering. Indien sturing door middel van KAD wordt toegepast neemt de maximale piekafvoer tot ongeveer 5 mm per dag. De neerslag wordt langer vastgehouden en als het niveau van de KAD put wordt verlaagd, komt deze vastgehouden neerslag tot afvoer.



Figuur 22. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 21-jun-1985 voor de huidige situatie (boven) en onder het 2050W klimaatscenario (onder).

GWL = grondwaterstand, CREST = instelling KAD put, WLS = waterniveau in de KAD put



Figuur 23. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 21-jun onder het 2050W klimaatscenario met KAD controle.

GWL = grondwaterstand, CREST = instelling KAD put, WLS = waterniveau in de KAD put

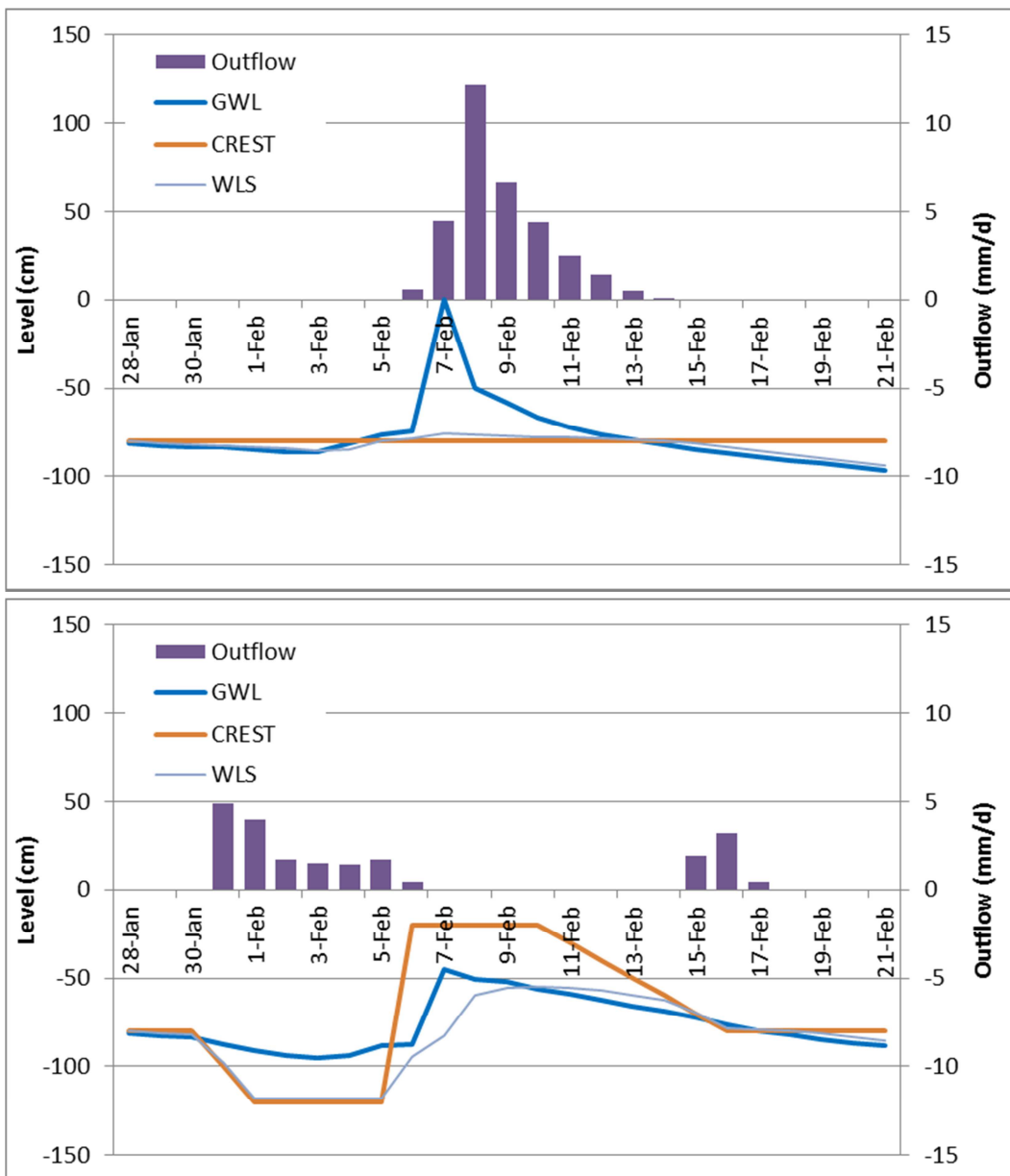
Op 7-feb-1984 was er 37 mm neerslag gevallen. Onder het W scenario zou dit 40 mm bedragen, volgens het KNMI transformatie programma. Wederom is gekeken hoe het afvoerverloop zou zijn onder: (i) huidige situatie, (ii) toekomstige situatie zonder KAD sturing en (iii) toekomst met KAD sturing. In de vijf dagen voor 7-feb was ook al 28 mm neerslag gevallen, die afvoer genereerde (Figuur 25).

De hoogste piekafvoer die deze bui genereert volgens het gekalibreerde SWAP model op de dag zelf en de dag erna is:

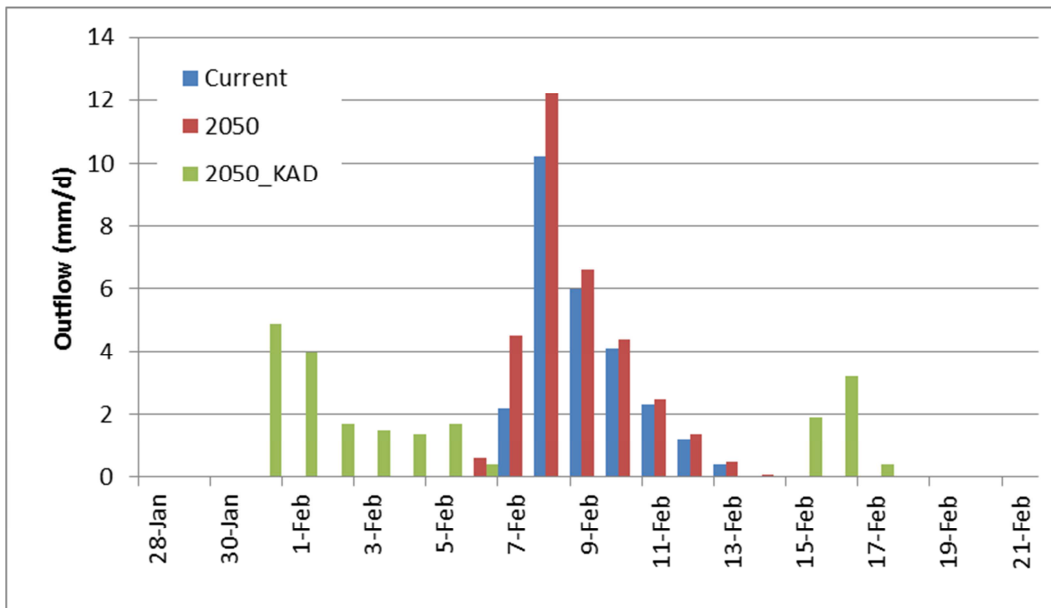
- huidig: 10 mm/dag
- 2050W, zonder KAD sturing: 12 mm/dag
- 2050W, met KAD sturing: 0 mm/dag

Figuur 24 laat zien wat het effect van de KAD sturing is. Zonder sturing begint de afvoer op 7-feb op gang te komen om te pieken op 8-feb. De KAD put wordt op 30-jan naar beneden gezet om zodoende meer vasthoudcapaciteit te creëren. Dit zal een afvoer van ongeveer 3 tot 5 mm per dag genereren over een aantal dagen. De piekafvoer van 8-feb zal echter volledig achterwege blijven.

Samenvattend kan dus de te verwachte toename in piekafvoer door klimaatverandering geheel worden opgelost door KAD in te zetten. Voor dit event kan zelfs de piekafvoer lager worden dan de huidige situatie. Dit is gebaseerd op de gestandaardiseerde KAD sturing en zou mogelijk nog verder kunnen worden geoptimaliseerd.

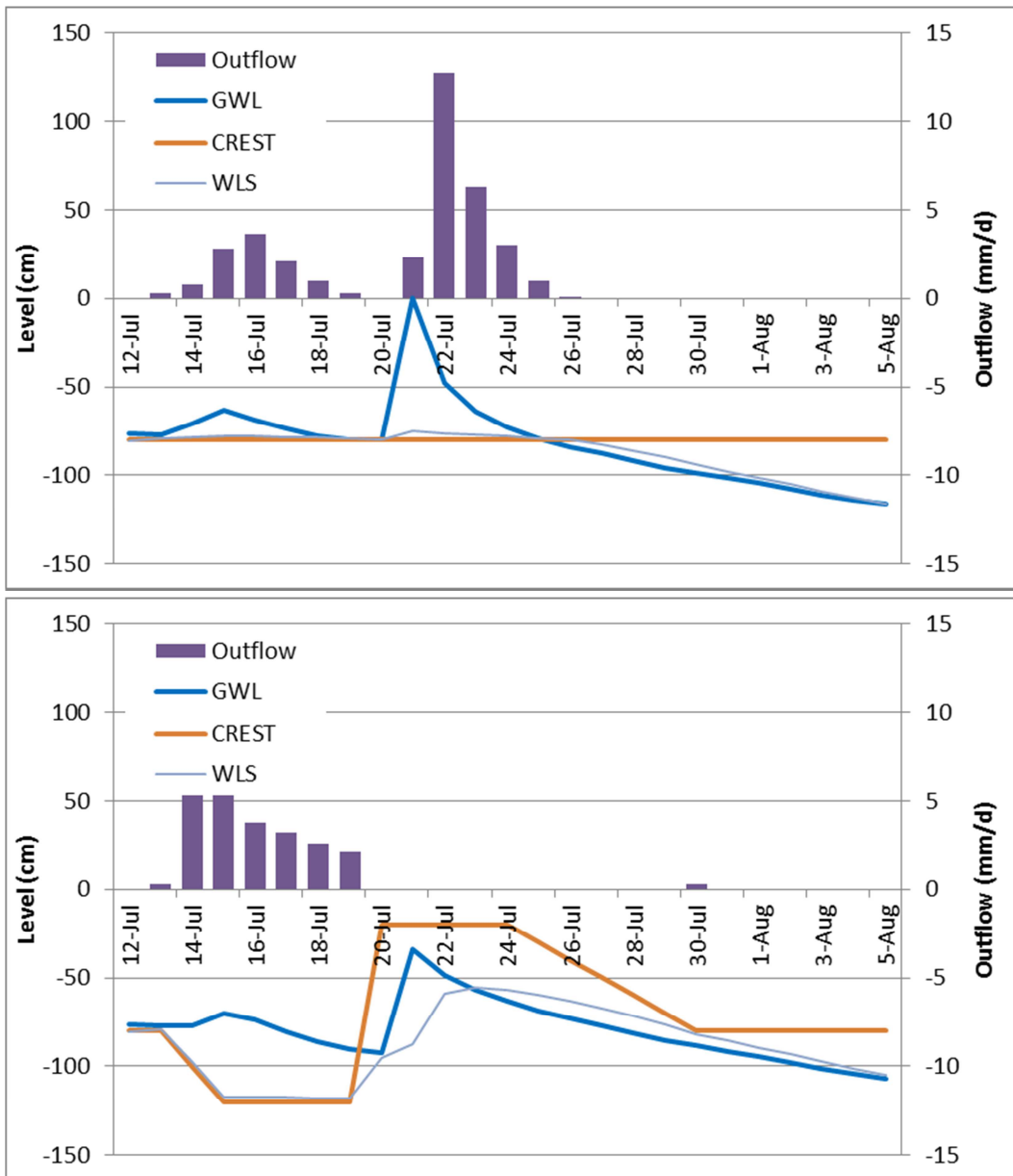


**Figuur 24. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 7-feb-1984 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD sturing (onder).
GWL = grondwaterstand, CREST = instelling KAD put, WLS = wate niveau in de KAD put**



Figuur 25. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 7-feb-1984 voor huidig, 2050W zonder en 2050W met KAD sturing.

Het neerslag event van 21-jul-1980 is het derde voorbeeld dat hier wordt getoond. Op deze dag viel 40 mm neerslag, wat rond 2050 ongeveer 51 mm zou bedragen volgens het W scenario. Afvoeren volgens het gekalibreerde SWAP model zijn te zien in Figuur 26 voor het W scenario, zonder en met KAD sturing. Dit event kan gezien worden als een standaard voorbeeld voor de werking van KAD. Een week voor het event neemt de afvoer iets toe in vergelijking met de situatie zonder sturing. Een dag voor het neerslag event is de vasthoudcapaciteit van de bodem aanzienlijk verhoogd. Op de dag van de neerslag en de dag erna wordt veel water vastgehouden, wat vervolgens de dagen hierna geleidelijk tot afvoer wordt gebracht door het KAD put niveau te verlagen.



Figuur 26. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 21-jul-1980 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD sturing (onder).

5.2 Marwijksoord

Voor Marwijksoord zijn dezelfde analyses uitgevoerd als voor Haaksbergen gebruik makend van het gekalibreerde SWAP model voor Marwijksoord:

- Zonder KAD sturing
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W+ klimaatscenario (=droog)
- Met sturing via KAD
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)

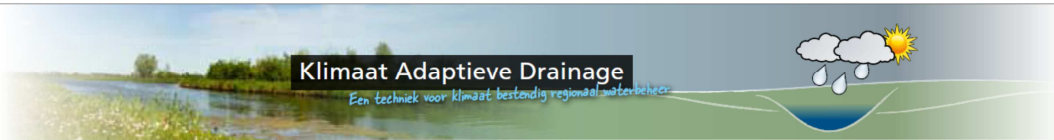
In Tabel 8 is te zien wat de overschrijdingskansen van afvoeren zijn onder de huidige situatie en onder de twee klimaatscenario's. Het is duidelijk dat indien er geen maatregelen worden genomen de te verwachte piekafvoeren zullen toenemen in de toekomst. Deze toename lijkt enigszins beperkt alhoewel in de hogere herhalingstijden ($T = 50$ jaar en hoger) de te verwachte piekafvoeren mogelijk moeilijk zijn op te vangen. Bijvoorbeeld bij een herhalingstijd van $T=100$ is de huidige afvoer 16 mm/dag en bij het 2050 W scenario 20 mm per dag; een toename van 25%. Deze toename zal een behoorlijke inspanning vergen van de waterbeheerder.

Om deze piekafvoeren in de toekomst op te vangen zou KAD kunnen worden ingezet. In deze studie is er voor gekozen om een standaard sturing toe te passen die bestaat uit:

- 7 dagen voor de te verwachte neerslagevent de buffercapaciteit te vergroten door de KAD put naar het laagste niveau te verplaatsen
- 1 dag voor het neerslagevent de KAD put op een zeer hoog niveau te zetten
- 5 dagen na het event de KAD put weer op het reguliere niveau te plaatsen.

Er is van uitgegaan dat het inzetten van KAD alleen gebeurt als de piekafvoer meer dan 10 mm per dag bedraagt onder het W scenario. Voor Marwijksoord komt dit slechts 10 maal voor over een periode van 30 jaar. Er zijn echter events waarbij deze 10 mm per dag achter elkaar voorkomen. Hiermee rekening houdend zou de KAD put voor vijf events hoeven worden ingezet. Het resultaat van deze sturing is te zien in Tabel 11. De resultaten in deze tabel zijn dus gebaseerd op 30 jaar simulaties met SWAP en voor 5 events. Het effect van de sturing lijkt dus enigszins beperkt te zijn met deze inzet. De $T=50$ en 500 en 1000 nemen iets af, maar bij de overige herhalingstijden lijkt de invloed van KAD om piekafvoeren te verminderen niet aanwezig te zijn.

Een aantal events is daarom wat meer in detail bekeken. Het eerste event is dat van 22-mei-1997. Neerslag op die dag was 55 mm en de dag ervoor 28 mm. Uit Figuur 27 blijkt dat de piekafvoeren op die dag ongeveer 15 mm bedragen. Onder klimaatverandering lijkt deze piekafvoer niet zeer veel groter te worden, maar de afvoer begint al wel een dag eerder waarbij de benedenstroomse gebieden zwaarder worden belast. Uit dezelfde figuur blijkt dat KAD wel degelijk de piekafvoer vermindert. De afvoeren tijdens het weer omlaag plaatsen van het KAD



put niveau (rond 30-mei) zijn echter relatief hoog en mogelijk zou hier wat langer mee gewacht moeten worden. Uiteraard hangt dit volledig van de situatie op dat moment in het benedenstroomse gebied af.

Een tweede event wat in detail is bekeken is die van 5-okt-1993 (Figuur 28). Op de twee dagen ervoor viel 62 mm terwijl de week ervoor ook al 67 mm was gevallen. De piekafvoer zonder KAD sturing zou ongeveer 144 mm per dag zijn geweest, terwijl dit met KAD sturing beperkt zou blijven tot 5 mm per dag. Echter bij het laten zakken van de KAD put vanaf 7 okt met 20 cm per dag, ontstaan er relatief hoge afvoeren. Wederom hangt het van het benedenstroomse gebied af, of dit eventueel lager had gemoeten en hoeveel andere KAD-sturingsgebieden er aanwezig zijn.

Het laatste event waar meer in details is naar gekeken is dat van 22-sep-2001. Op die dag viel 40 mm neerslag, maar de week ervoor viel ook nog eens 76 mm. Ook bij dit event lijkt het patroon zich te herhalen (Figuur 29): een grote reductie tijdens het neerslagevent zelf, maar redelijk hoge afvoeren tijdens het laten zakken van de KAD put naar het reguliere niveau.

Als conclusie kan gesteld worden dat ook voor Marwijksoord er een aanzienlijke reductie in piekafvoeren kan worden gerealiseerd met de inzet van KAD. Dat dit minder tot uiting komt in de statistieken zoals weergegeven in Tabel 11, komt door de grotere pieken tijdens het laten zakken van de KAD put. Duidelijk zou Marwijksoord gebaat zijn bij een geoptimaliseerde sturing, maar hierbij is het noodzakelijk om situatie op de andere percelen in de omgeving en de benedenstroomse gebieden mee te nemen.

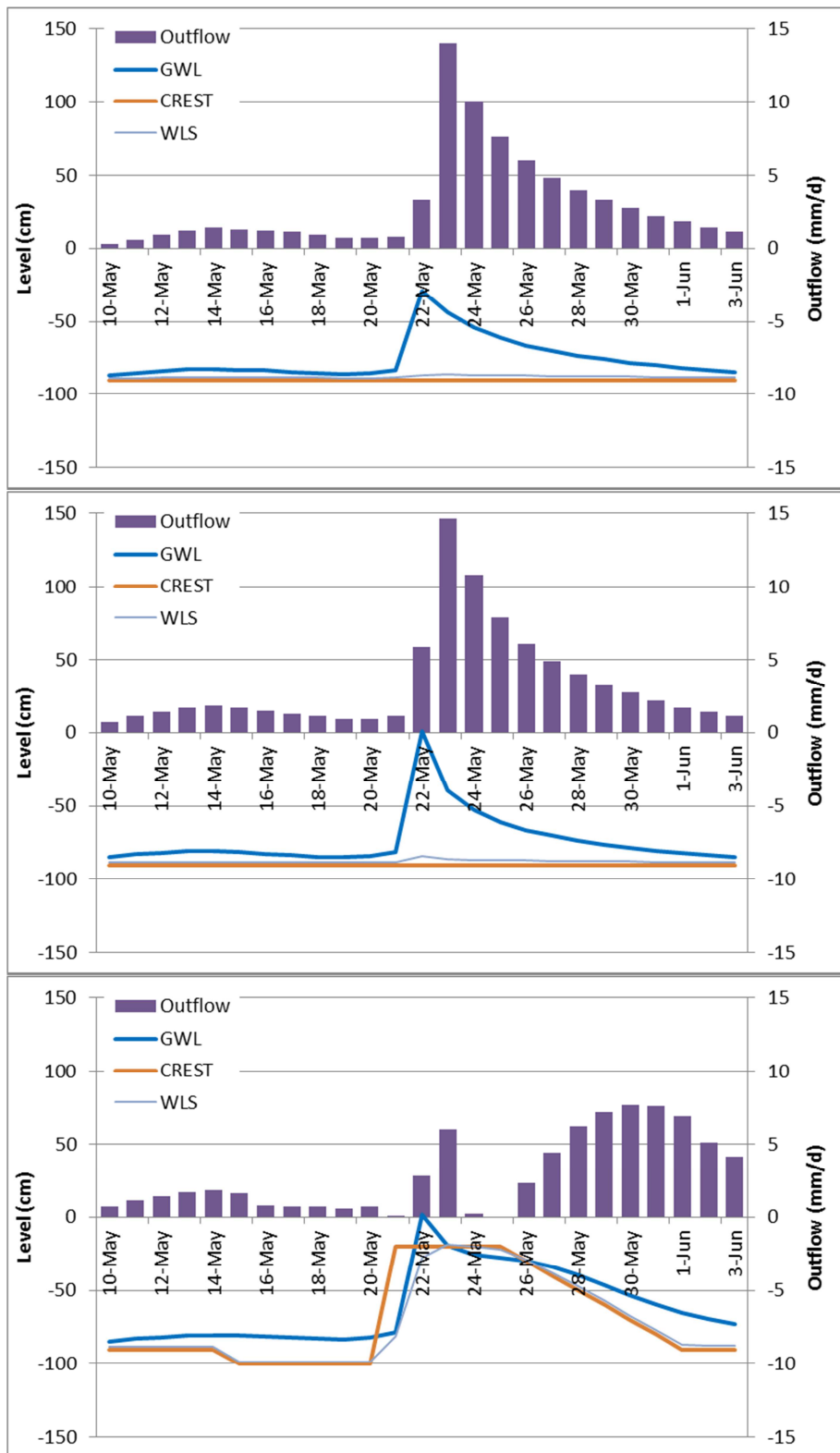
Tabel 10. Herhalingstijden afvoeren (in mm/d) zonder KAD sturing voor de huidige situatie en onder klimaatverandering.

T (jaar)	Current ===== (mm/dag)	2050W ===== (mm/dag)	2050W+ =====
1	7	8	8
10	11	13	10
25	13	15	11
50	15	18	12
100	16	20	13
500	22	28	16
1000	25	32	17

Tabel 11. Herhalingstijden afvoeren (in mm/dag) voor het 2050W scenario zonder en met KAD sturing.

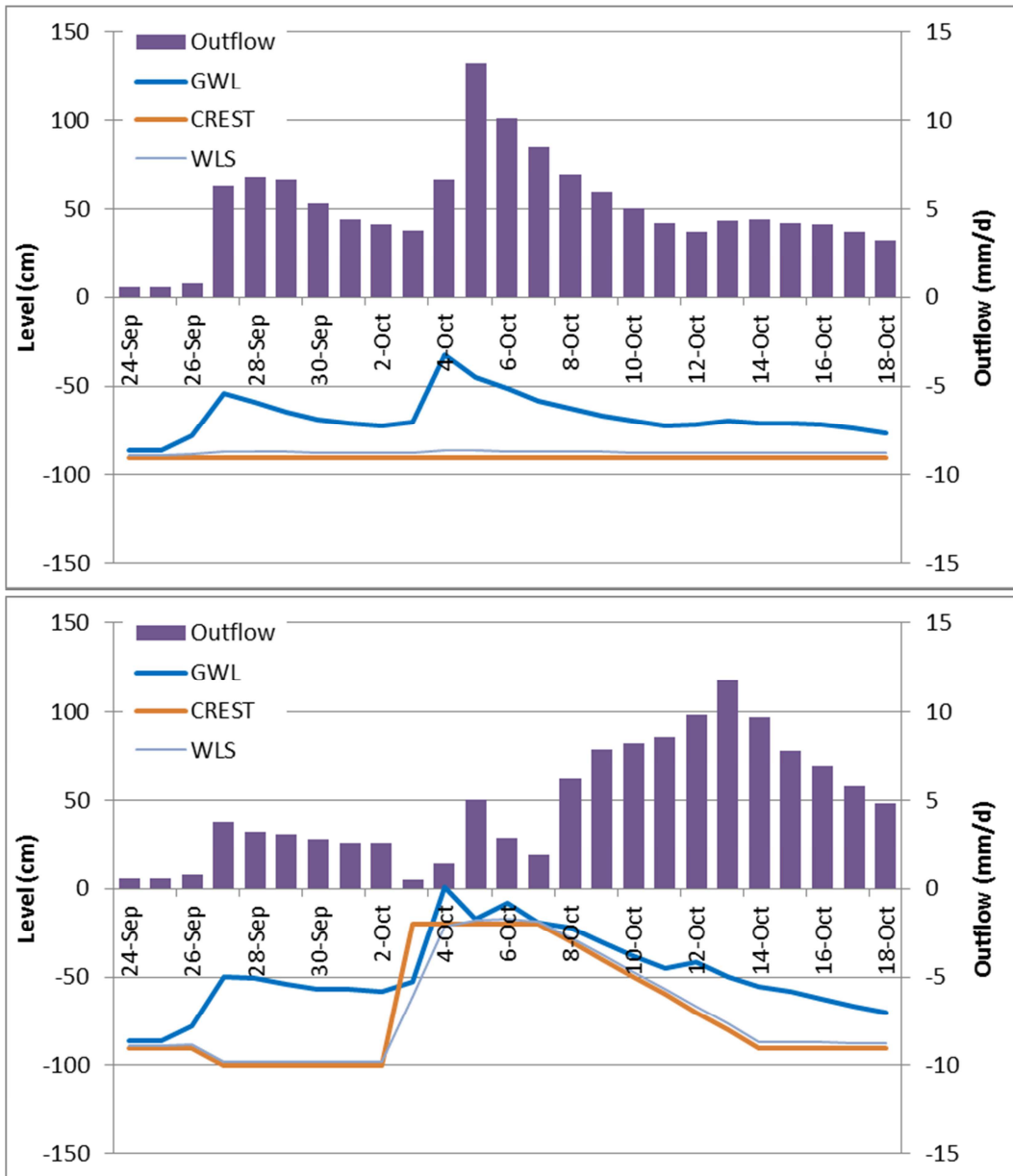
T (jaar)	Zonder KAD ===== (mm/dag)	Met KAD =====
1	8	9
10	13	13
25	15	15
50	18	17
100	20	20
500	28	26
1000	32	30



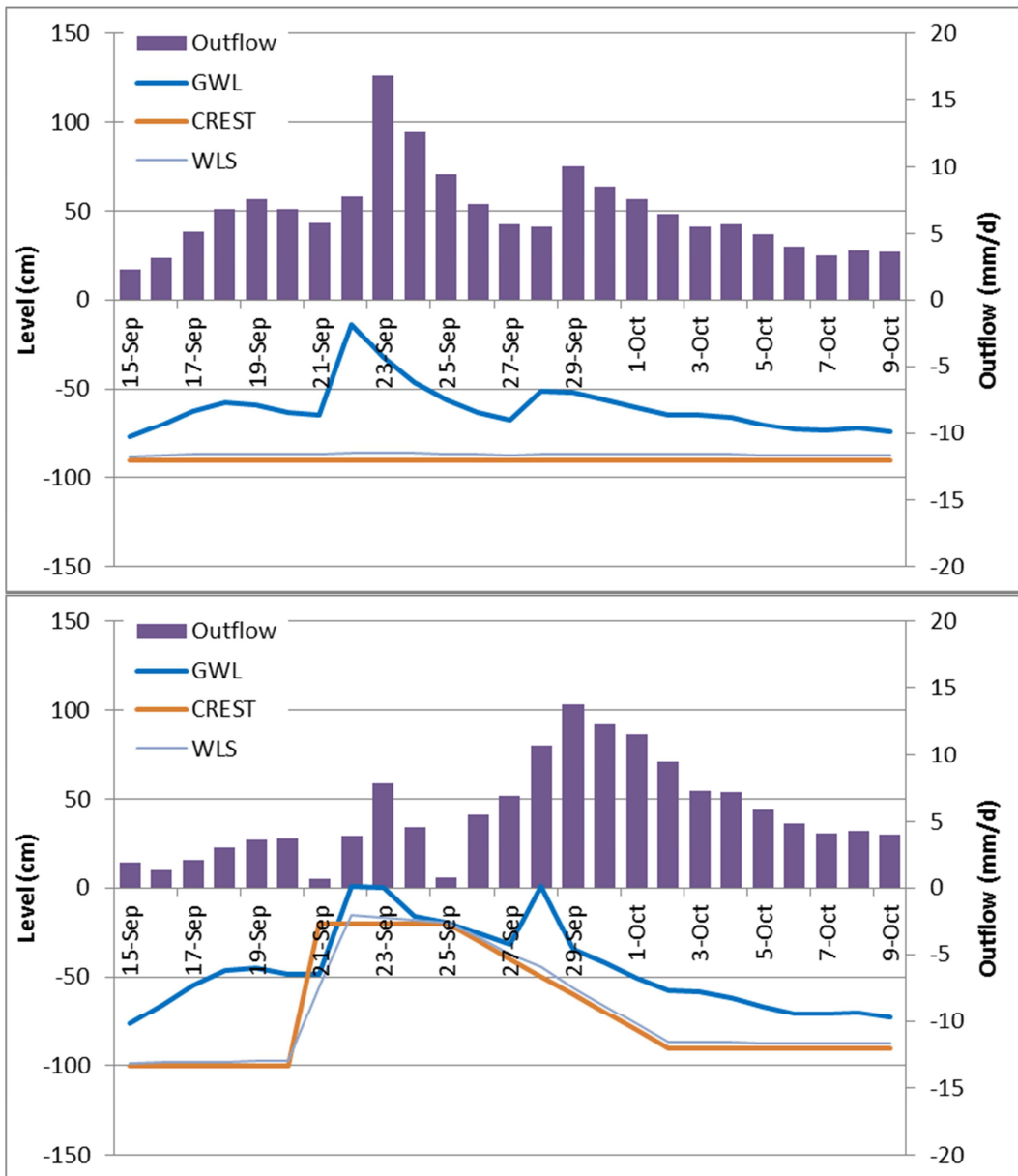


Figuur 27. Piekafvoer tijdens een event op 22-mei-1997 voor de huidige situatie (boven), het 2050W klimaatscenario (midden) en 2050W met KAD sturing (onder).

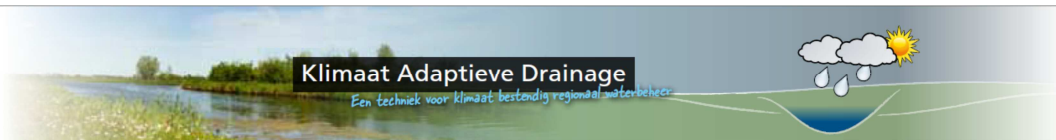
GWL = grondwaterstand, CREST = instelling KAD put, WLS = water niveau in de KAD put



Figuur 28. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 5-okt-1993 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD sturing (onder).



Figuur 29. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 22-sep-2001 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD sturing (onder).



5.3 Rijsbergen

Het gekalibreerde en gevalideerde SWAP model zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, is gebruikt voor het analyseren van de invloed van klimaatverandering op piekafvoeren. Er zijn hiertoe de volgende simulaties uitgevoerd:

- Zonder KAD sturing
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W+ klimaatscenario (=droog)
- Met sturing via KAD
 - Huidige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 1990 (1976-2005)
 - Toekomstige situatie met standaard drainage: 30 jaar rondom 2050 onder het W klimaatscenario (=nat)

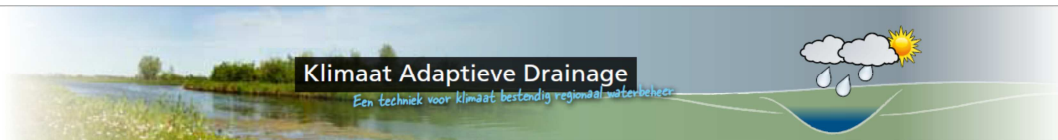
In Tabel 12 is te zien wat de overschrijdingskansen van afvoeren zijn onder de huidige situatie en onder de twee klimaatscenario's. Het is duidelijk dat indien er geen maatregelen worden genomen de te verwachte piekafvoeren flink zullen toenemen in de toekomst. Zelfs onder het "droge" W+ scenario zullen piekafvoeren iets toenemen in vergelijking met de huidige situatie. Vooral de piekafvoeren met een herhalingsstijd van $T = 10$ jaar kan een verhoging van 30% te verwachten zijn onder het 2050W scenario. Voor een $T = 50$ jaar is zelfs een verhoging van 50% te verwachten.

Om deze piekafvoeren in de toekomst op te vangen zou KAD kunnen worden ingezet. In deze studie is er voor gekozen om een standaard sturing toe te passen die bestaat uit:

- 7 dagen voor de te verwachte neerslagevent de buffercapaciteit te vergroten door de KAD put naar het laagste niveau te verplaatsen
- 1 dag voor het neerslagevent de KAD put op een zeer hoog niveau te zetten
- 5 dagen na het event de KAD put weer op het reguliere niveau te plaatsen.

Voor Rijsbergen is ervan uitgegaan dat het reguliere niveau 80 cm beneden maaiveld is. Als laagste niveau is 118 cm en als hoogste 20 cm beneden maaiveld gekozen. Uiteraard zijn er vele varianten op deze standaard piekafvoer reductie strategie te bedenken. Vooralsnog is voor alle events die een hogere piekafvoer van 10 mm per dag zouden genereren onder het W+ scenario deze strategie toegepast. In totaal gaat het dus om 16 dagen. Sommige van deze dagen vallen achter elkaar, hiermee rekening houdend gaat het om 10 events in totaal.

Het resultaat van deze sturing is te zien in Tabel 13. Deze Tabel laat duidelijk zien dat met een standaard sturing het aantal piekafvoeren duidelijk is te verminderen.



Tabel 12. Herhalingstijden afvoeren (in mm/d) zonder KAD sturing voor de huidige situatie en onder klimaatverandering.

T (jaar)	Current =====	2050W (mm/dag)	2050W+ =====
1	7	8	8
10	13	17	14
25	16	22	17
50	18	27	19
100	21	33	22
500	31	54	31
1000	36	66	36

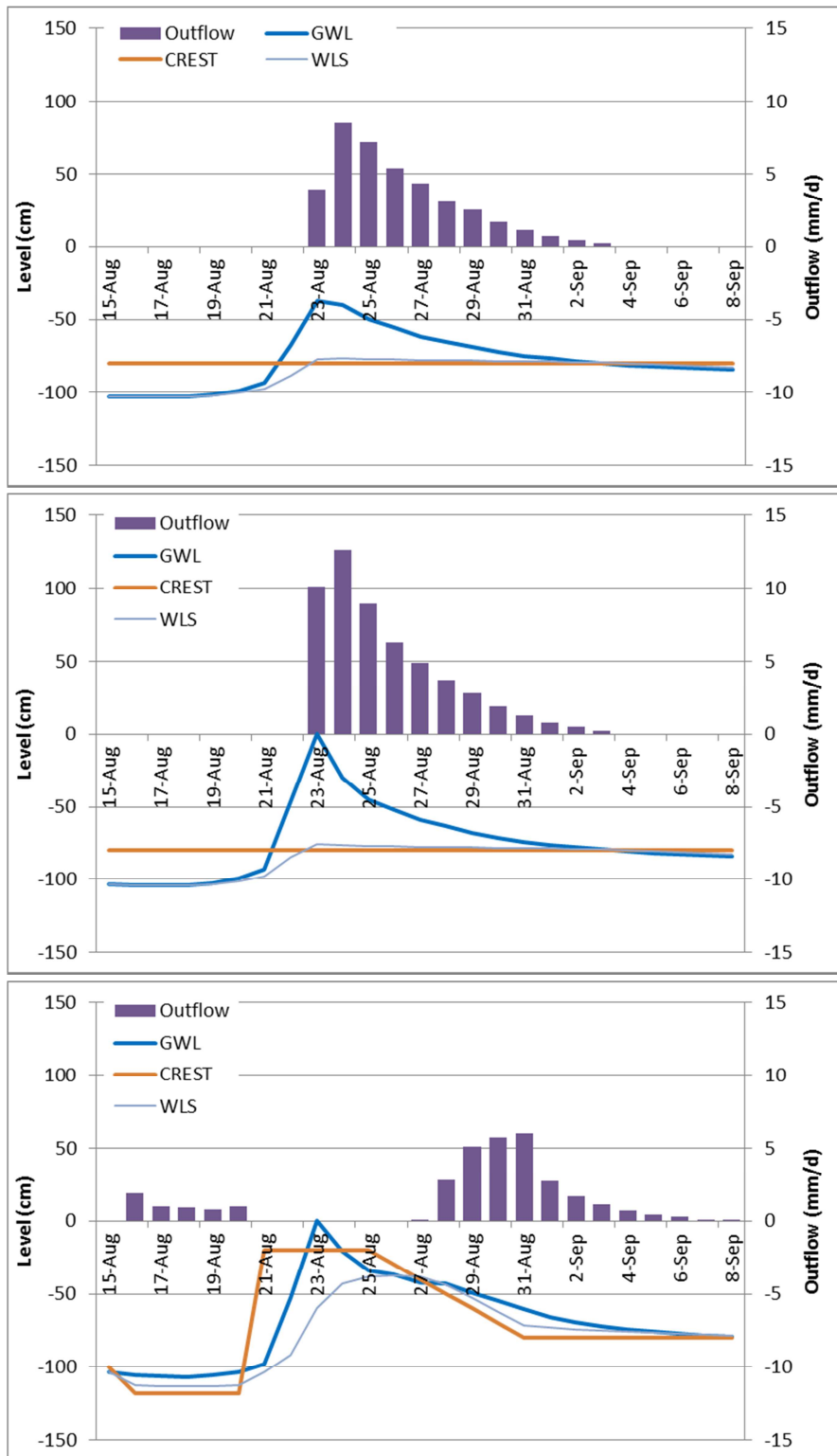
Tabel 13. Herhalingstijden afvoeren (in mm/dag) voor het 2050W scenario zonder en met KAD sturing.

T (jaar)	Zonder KAD =====	Met KAD =====
1	8	8
10	17	15
25	22	19
50	27	23
100	33	27
500	54	42
1000	66	51

Een aantal van deze event is meer in detail bestudeerd:

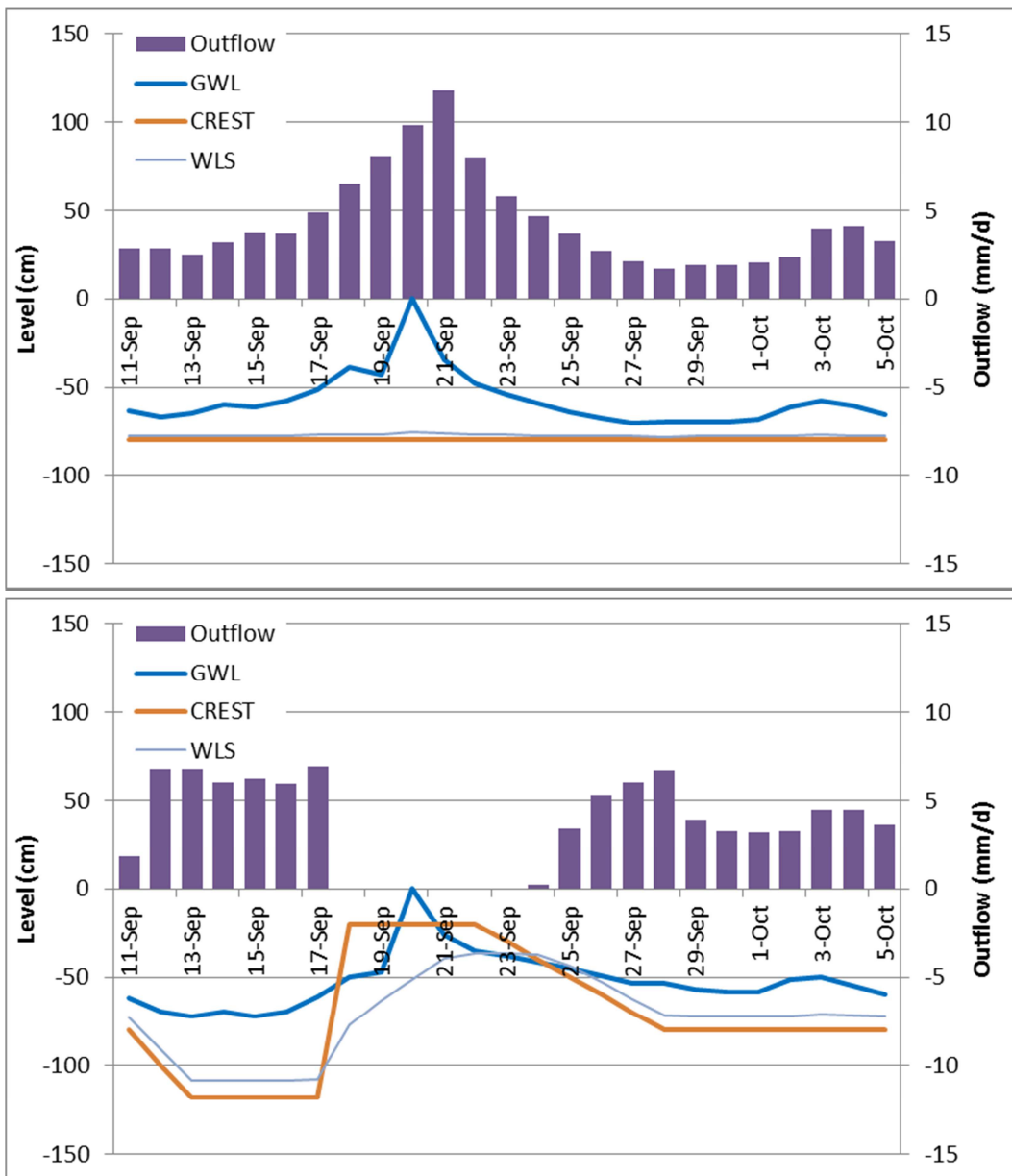
- 22-aug-1977: 18-24 aug 134 mm met op 22-aug 44 mm (current)
- 20-dec-2002: winter, natte periode
- 14-sep-1998: herfst, extreme bui

Voor alle drie de events is te zien dat KAD sturing de piekafvoer aanzienlijk kan reduceren (Figuur 30 en Figuur 31). Alleen voor het zeer extreme event van sep-1998 (Figuur 32) is er een toename in piekafvoer te zien met KAD sturing. De neerslag op 14-sep was 116 mm en waarschijnlijk is de KAD-put al een paar dagen te vroeg op een hoger niveau gezet, omdat er de dagen voor 14-sep ook aanzienlijke hoeveelheden neerslag zijn gevallen.

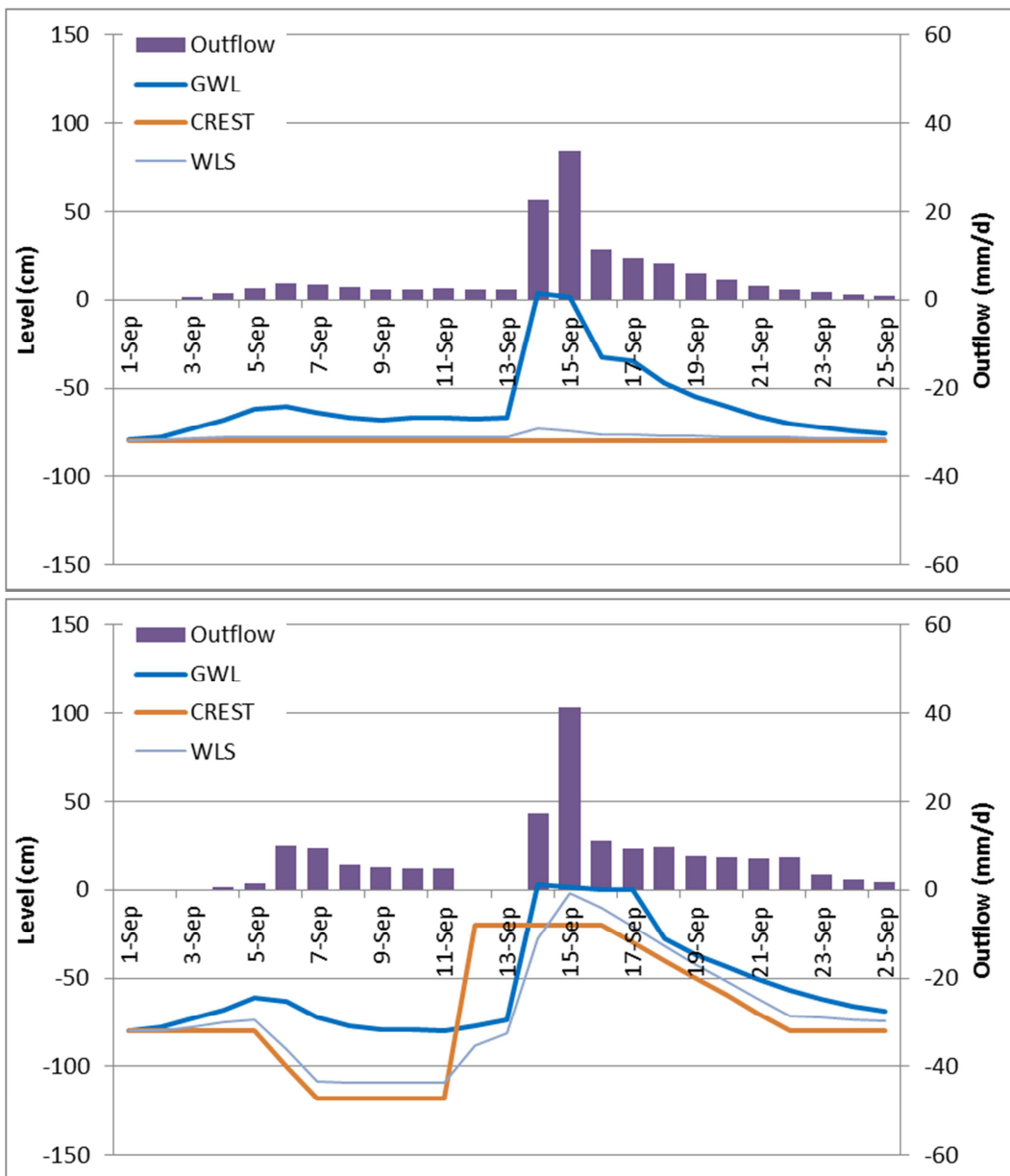


Figuur 30. Piekafvoer tijdens een event op 22-aug-1977 voor de huidige situatie (boven), het 2050W klimaatscenario (midden) en 2050W met KAD sturing (onder).

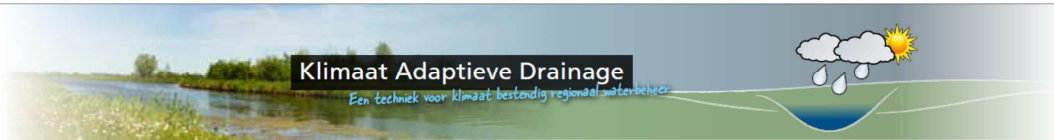
GWL = grondwaterstand, CREST = instelling KAD put, WLS = water niveau in de KAD put



Figuur 31. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 21-sep-2001 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD-sturing (onder).



Figuur 32. Piekafvoer tijdens een neerslag event op 14-sep-1998 onder het 2050W klimaatscenario zonder KAD sturing (boven) en met KAD sturing (onder).



6 Vermindering wateraanvoerbehoefte

In principe zou KAD ook kunnen worden ingezet om water vast te houden in het profiel (conserveren) door minder water uit het perceel te draineren. Dit kan gebeuren door in het voorjaar het drainageniveau door middel van de KAD-put omhoog te brengen, en water dat anders zou draineren te conserveren. Het resultaat is dat hiermee de wateraanvoerbehoefte voor de landbouw lager kan worden. Vooral indien het klimaat zich ontwikkelt richting het W+ scenario zal droogte in de zomer een groot probleem kunnen worden.

Het voordeel van deze sturing lijkt evident en zal invloed hebben op een aantal processen. Ten eerste zal er langer water in het voorjaar worden geconserveerd dat in het groeiseizoen ter beschikking staat voor de plant. Ten tweede zal gedurende zomerse buien ook water langer worden vastgehouden omdat er minder draineert. Ten derde is er ook nog het proces van redistributie van water binnen het perceel: door het drainage systeem zal water van de wat nattere plekken stromen naar de drogere plekken en daar kunnen infiltreren. Ten slotte, het KAD-systeem kan ook kunnen worden gebruikt als alternatief wateraanvoersysteem in plaats van beregening.

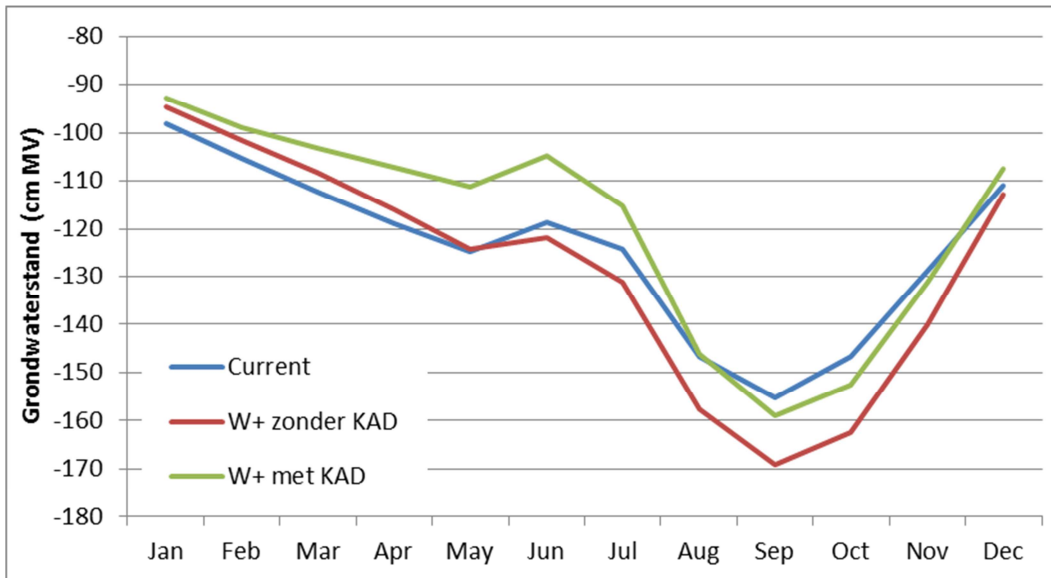
Met behulp van het gekalibreerde SWAP-model zijn de gevolgen van klimaatverandering bepaald en is ook gekeken wat de effecten van de inzet van KAD zijn. In deze studie is er voor gekozen om een standaardsturing toe te passen die bestaat uit:

- Op 1 april van elke jaar wordt de KAD-put op een hoog niveau gezet
- Op 1 oktober van elk jaar wordt de KAD-put op een laag niveau gezet

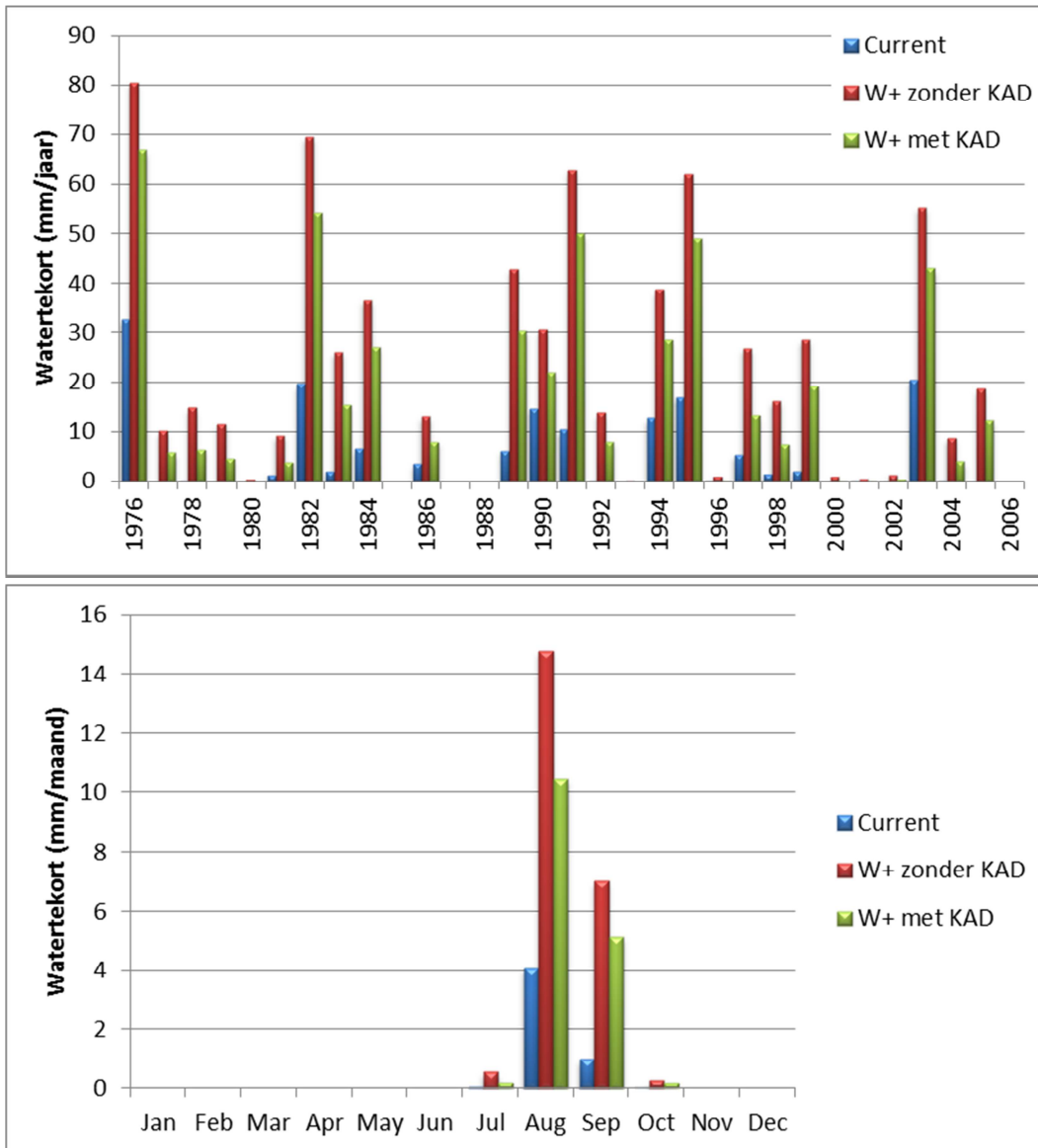
Voor Haaksbergen is het hoge niveau 20 cm beneden maaiveld en het lage niveau 80 cm beneden maaiveld. Uiteraard kan deze standaardsturing verder worden verfijnd afhankelijk van gewas, weer, en grondbewerkingsafhankelijke factoren.

Samenvattende resultaten van deze modelsimulaties zijn te zien in Figuur 33 tot en met Figuur 38 voor de drie gebieden. De belangrijkste conclusies zijn:

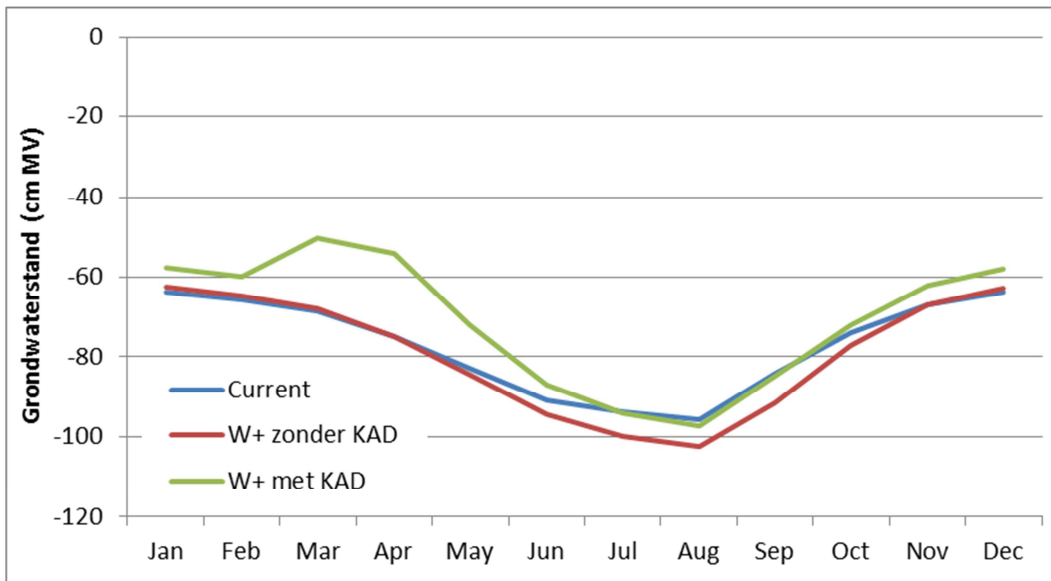
- Het lijkt erop dat het watertekort voor alle drie gebieden relatief klein is. Het is vooralsnog niet helemaal duidelijk of dat in werkelijkheid ook zo is, of dat de invoergegevens voor het SWAP-model minder goed waren. Wel is duidelijk dat voor deze studie het model op afvoeren en grondwaterstanden is gekalibreerd en gevalideerd en minder op droogte.
- Hetzelfde SWAP-model en data is zowel gebruikt voor de huidige situatie, situatie 2050W+ zonder en met KAD-sturing. Met andere woorden, de relatieve verschillen zullen wat nauwkeuriger zijn dan de absolute waarden.
- Het watertekort onder het 2050W+ scenario zal voor de droge jaren meer dan verdubbelen.
- Met KAD-sturing kan een aanzienlijke reductie van watertekort (gedefinieerd als het verschil tussen ETpot en ETact) worden gehaald. De reductie is erg locatie en jaar afhankelijk, maar kan wel in de meest extreme gevallen wel tot 70 mm per jaar watertekort reductie leiden (Figuur 38).



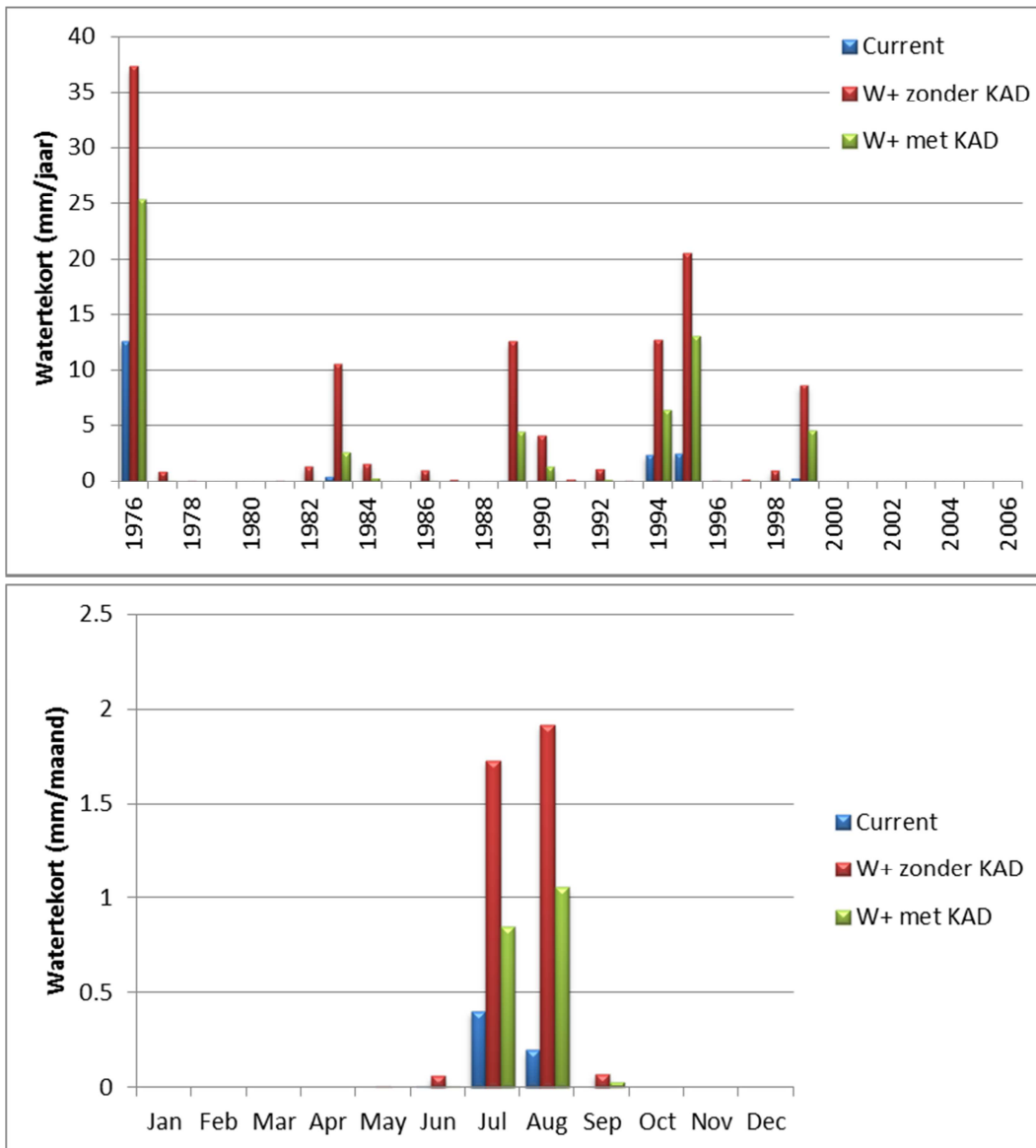
Figuur 33. Gemiddeld maandelijkse grondwaterstanden voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Haaksbergen.



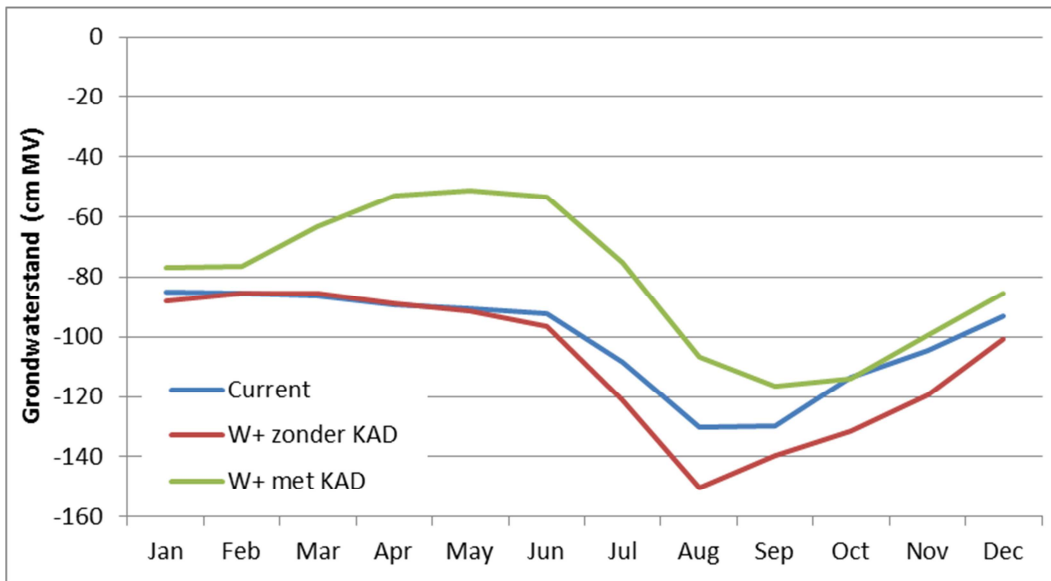
Figuur 34. Jaarlijks (boven) en maandelijks (onder) watertekort voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Haaksbergen.



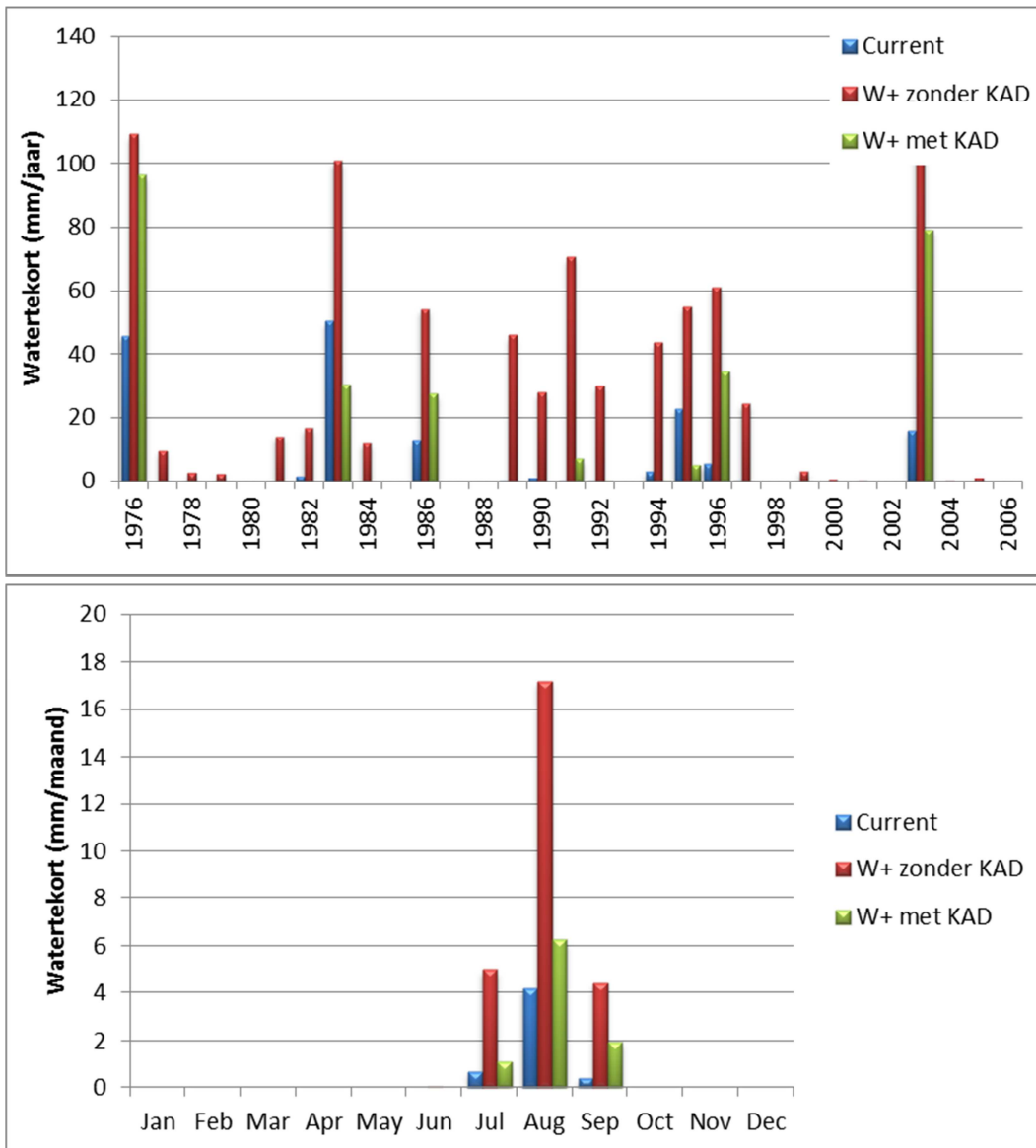
Figuur 35. Gemiddeld maandelijks grondwaterstanden voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Rijsbergen.



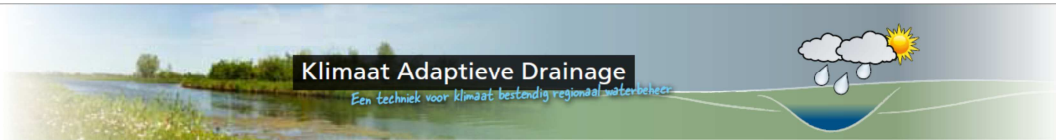
Figuur 36. Jaarlijks (boven) en maandelijks (onder) watertekort voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Rijsbergen.



Figuur 37. Gemiddeld maandelijks grondwaterstanden voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Marwijksoord.



Figuur 38. Jaarlijks (boven) en maandelijks (onder) watertekort voor een periode van 30 jaar voor de huidige situatie, de situatie onder het W+ scenario zonder en met KAD sturing voor Marwijksoord.



7 Conclusies

Het gebruik van SWAP als een laboratorium om het functioneren van KAD onder klimaatverandering te bestuderen, geeft inzicht in omstandigheden die in het veld nog niet zijn opgetreden. Het kalibreren en valideren van de drie modellen is redelijk geslaagd, waarbij de korte meetreeks wel een beperking was. Ook was de situatie voor Marwijksoord lastiger gezien de keileemlaag. Aangezien dezelfde modellen zijn gebruikt voor de huidige en de toekomstige situatie en er vooral gekeken is naar relatieve verschillen, zullen de uiteindelijke waargenomen trends redelijk betrouwbaar zijn.

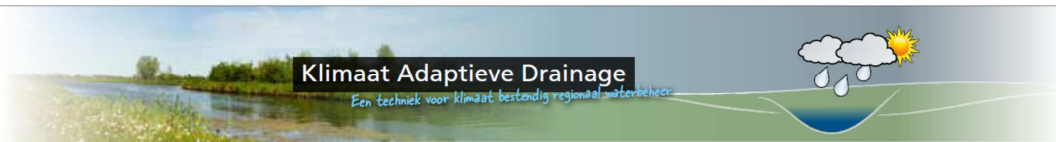
De grootste verbetering die in werkelijkheid zou kunnen worden doorgevoerd is een geoptimaliseerde sturing van de KAD put. Er zijn nu relatief simpele beslisregels doorgerekend waarbij de positieve effecten van KAD al aanzienlijk waren. Bij een locatie specifieke en tijd specifieke aanpak is mogelijk nog meer winst te behalen.

Een verbetering is al te behalen door te reguleren op afvoer. Zodra de afvoer meer dan 10 mm/d is dan de stand 10 cm omhoog en zodra onder de 10 mm/d dan weer 10 cm omlaag tot normaal zomerpeil is bereikt. Dus zo lang mogelijk zo veel mogelijk afvoeren conform de trits afvoeren-vasthouden-bergen-afvoeren.

Een verdere verfijning op dit basis idee is als volgt:

- Twee soorten boeren: conservatief (risicomijdend) en progressief (risiconemend)
- Vertaalt zich in kans op hoge afvoer (mogelijk vochttekort) en verwachtingswaarde van neerslaghoeveelheid komende 5 dagen
- Deze verwachtingswaarde is som van kansen maal hoeveelheden
- Op elk moment zijn er 10 bekend, op basis van historische reeks van ensembles.
- De 10% hoogste is bepalend voor risicomijdende boer, de 30% laagste voor de risiconemende boer
- Als afvoerverwachting is meer 10 mm/d dan peil omlaag
- Peil pas omhoog als actuele afvoer meer dan 10 mm/d en weer omlaag als afvoer minder dan 8 mm/d tot normale peil
- Al deze parameters al probenderwijs bij te stellen





8 Referenties

Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 189 pp.

Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink (red.), 2009. Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's, KNMI, De Bilt.

Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Wageningen-UR, Alterra. Alterra Report 1649 (02), 262 pp.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research 12, 1976, 513-522.

Van Dam, J.C, 2000. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen Universiteit, 167 pp.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot, and J. Stolte, 2001. Water retention and hydraulic conductivity functions of top- and subsoils in The Netherlands: The Staring Series. Alterra Report 153, Wageningen, The Netherlands, 86 pp.

