
Metingen en proceskennis vereist voor nauwkeurige verdampingsberekening in grondwatermodellen

Ruud Bartholomeus¹, Bernard Voortman², Jan-Philip Witte³

Samen met de neerslag, en eventuele oppervlakteafvoer, bepaalt de verdamping de hoeveelheid water die doorsijpelt naar het grondwater. Een nauwkeurige bepaling van de verdamping in hydrologische modellen is daarom van belang voor nauwkeurige simulaties van de grondwateraanvulling en de hoogte en dynamiek van de grondwaterstand. Dat geldt voor de heersende weerscondities, maar ook voor scenarioanalyses zoals klimaatprojecties. Nagenoeg alle regionale hydrologische modellen gebruiken gewasfactoren voor het vaststellen van de potentiële verdamping. In dit artikel laten we zien dat het gebruik van deze empirische factoren kan resulteren in aanzienlijke fouten in de potentiële verdamping, en daarmee in de grondwateraanvulling. Vooral voor bossen kan de fout in het neerslagoverschot door gebruik van gewasfactoren tientallen procenten bedragen, zelfs als verdamping van interceptiewater expliciet wordt gesimuleerd. De conclusie dat het gebruik van gewasfactoren met grote onzekerheden is omgeven is niet nieuw. Hier laten we echter zien dat ook voor langjarig-(klimaat)-gemiddelde schattingen van de potentiële verdamping, de gewasfactorbenadering moet worden afgeraden. Voor nauwkeurige hydrologische analyses is het nodig te investeren in meetgegevens en op basis daarvan het verdampingsproces in modellen beter te schematiseren. Dit geldt niet alleen voor klimaatprojecties, maar ook voor het huidige klimaat.

Inleiding

De verdamping (E) bestaat uit drie termen: de transpiratie van planten (E_t), de interceptie van neerslagwater door planten (E_i), en de verdamping van de bodem (E_s) (NHV, 2002):

$$E_{\text{tot}} = E_t + E_i + E_s \quad (1)$$

Niet alle grondwatermodellen berekenen deze termen afzonderlijk. Eén van de belangrijkste variabelen in de meeste grondwatermodellen is de potentiële verdamping (E_p) (Federer e.a., 1996; Zhou e.a., 2006). Deze E_p wordt in de berekening gereduceerd tot de werkelijke (actuele) verdamping, afhankelijk van de vochtcondities in de wortelzone. Samen met de neerslag, bepalen de potentiële en hiermee de werkelijke verdamping

¹ KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein (ruud.bartholomeus@kwrwater.nl)

² KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein (bernard.voortman@kwrwater.nl)

³ KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein; Vrije Universiteit Amsterdam (flip.witte@kwrwater.nl)

en de hoeveelheid water die doorsijpelt naar het grondwater, de grondwateraanvulling. Een nauwkeurige bepaling van de potentiële verdamping is daarom van belang voor nauwkeurige simulaties van de grondwateraanvulling en bijvoorbeeld de grondwaterstandsdynamiek. Dat geldt voor het huidige klimaat, waarbij het effect van een waterhuishoudkundige maatregel moet worden berekend, maar ook voor klimaatprojecties.

In de meeste hydrologische simulaties wordt de potentiële verdamping afgeleid uit de referentiegewasverdamping (E_{ref}) via empirische gewasfactoren (K). (Allen e.a., 1998; Doorenbos en Pruitt, 1977; Feddes, 1987):

$$E_p = K \cdot E_{\text{ref}} \quad (2)$$

E_{ref} is gedefinieerd als de verdamping van een referentiegewas, meestal een kort, groen gewas dat de bodem volledig bedekt, en waarvan het plantoppervlak droog is en de plantenwortels optimaal van zoet water worden voorzien. Internationaal wordt E_{ref} berekend met de Penman-Monteith vergelijking, geparametriseerd voor gras of alfalfa (Allen e.a., 1998).

Per definitie (Allen e.a., 1998; NHV, 2002) maakt de interceptieverdamping (E_i) geen deel uit van de referentiegewasverdamping, omdat deze gedefinieerd is voor een droog gewas. De referentiegewasverdamping volgens Makkink ($E_{\text{ref_Mak}}$), zoals gebruikt door het KNMI, voldoet niet aan deze definitie. Makkink (1957) heeft zijn vergelijking namelijk afgeleid uit metingen onder 'gemiddelde' meteorologische condities, dus met inbegrip van de interceptiepost. In de berekening van $E_{\text{ref_Mak}}$ zit een empirische constante, welke $E_{\text{ref_Mak}}$ strikt genomen ongeschikt maakt voor klimaatprojecties. $E_{\text{ref_Mak}}$ geldt namelijk alleen voor de gemiddelde meteorologische condities die Makkink gebruikte voor zijn vergelijking.

Gewasfactoren voor Nederland zijn afgeleid uit waterbalansstudies, in het bijzonder van berekeningsexperimenten in het veld waarbij water is toegevoegd zodat het gewas potentieel verdampt (Feddes, 1987). Berekening leidt echter tot interceptie. Feddes (1987) benadrukt ook dat de door hem gepresenteerde gewasfactoren gemiddelden zijn over een reeks gemiddelde, droge en natte jaren, die niet homogeen verdeeld zijn. Gevolg van het gebruik van deze empirische gewasfactoren is dat ze het gecombineerde effect van bodemverdamping (E_s), transpiratie (E_t) en interceptieverdamping (E_i) over de meetreeks weergeven. Andere weerscondities kunnen echter leiden tot veranderingen in elk van deze verdampingsposten. Dit betekent dat gewasfactoren alleen toegepast kunnen worden onder meteorologische omstandigheden die vergelijkbaar zijn met die waarvoor ze zijn bepaald.

De gewasfactorbenadering van Feddes (1987) verschilt van die van de internationale standaard van de Food and Agriculture Organization FAO (Allen e.a., 1998), omdat de laatste benadering per definitie uitgaat van een gewas met een droog bladoppervlak (dus zonder interceptie) en dus alleen corrigeert voor E_s en E_t . Allen et al. (1998) geven aan dat hun gewasfactor met een factor 1.1-1.3 moet worden vermenigvuldigd, als interceptieverdamping optreedt. E_i kan E_s en E_t van een begroeid oppervlak aanzienlijk beïnvloeden en het is, ook voor korte gewassen, daarom van belang de bijdrage van E_i expliciet te beschouwen.

Allen e.a. (1998) stellen dat gewasfactoren (K -waarden, vergelijking [2]) niet klimaat-robuust zijn, in het bijzonder bij vegetaties die hoger zijn dan het referentiegewas. Zo zijn K -waarden afhankelijk van veranderingen in windsnelheid en relatieve luchtvochtigheid. Deze afhankelijkheid is groot voor aride, en klein voor humide klimaten. Dit kan duiden op een beperkte invloed van veranderende klimatologische condities op K -waarden voor Nederland (humide klimaat).

Dat op korte temporele schaal, maanden tot jaren, schommelingen in K -waarden kunnen optreden is bekend (Dolman e.a., 2000; Spieksma e.a., 1996) en gezien de hiervoor geschetste afhankelijkheid van K -waarden van het weer ook goed verklaarbaar. Als gewasfactoren weersafhankelijk zijn, dan ligt in lijn der verwachtingen dat ze ook afhankelijk zijn van de klimatologische gesteldheid (de weersomstandigheden over een periode van 30 jaar). Dit zou betekenen dat de gewasfactorbenadering ongeschikt is voor klimaatprojecties. Deze afhankelijkheid onderzoeken we hier via een conceptuele benadering. We richten ons daarbij op de robuustheid van K -waarden voor natuurlijke vegetaties onder veranderende klimatologische condities. Daarvoor leiden we K -waarden af volgens de internationale definitie (zonder interceptieterm) en vergelijken deze met K -waarden zoals deze verkregen worden uit metingen (inclusief interceptieterm). Vervolgens passen we de 'gemeten' K -waarden toe in klimaatprojecties om inzicht te verwerven in de nauwkeurigheid van de zo berekende potentiële verdamping E_p .

Methode

Voor onze analyse maken we geen gebruik van verdampingmetingen in het veld, maar, om de toepasbaarheid van K -waarden systematisch te ontrafelen, genereren we eerst synthetische 'meetreeksen' voor het huidige klimaat. Deze synthetische 'meetreeksen' zijn gebaseerd op een fysisch model waarmee E_t , E_s en E_i afzonderlijk zijn bepaald. Hieruit leiden we vervolgens K -waarden op maandbasis af. Deze passen we vervolgens toe om de potentiële verdamping te bepalen, voor zowel het huidige klimaat, als de KNMI'06 scenario's W en W+. Voor deze scenario's wordt ook weer de 'werkelijke' potentiële verdamping bepaald met het fysische model, zodat vervolgens de relatieve fout door het gebruik van gewasfactoren kan worden vastgesteld.

Voor deze analyse gebruiken we het SWAP model (Van Dam e.a., 2008). SWAP kan de potentiële verdamping berekenen, uitgaande van het standaard referentiegewas (aerodynamische weerstand = 70 s m^{-1} , gewashoogte = 12 cm, albedo = 0.23); dit geeft de referentiegewasverdamping volgens Penman-Monteith. Door uit te gaan van de werkelijke gewasgegevens (gewasweerstand, hoogte en albedo) (Kroes e.a., 2009) kan de 'werkelijke' potentiële verdamping van verschillende vegetaties worden gesimuleerd. Voor een overzicht en uitgebreide beschrijving van SWAP en de berekening van E_t , E_s en E_i wordt verwezen naar Kroes e.a. (2009).

Voor de analyse gaan we uit van de gewasbestanden zoals die in het Nationaal Hydrologische Instrumentarium NHI gebruikt zijn voor de berekening van verdamping van begroeid oppervlak. We beschouwen alleen een referentiegrasland en vijf natuurlijke vegetaties: natuurlijk grasland, struikheide, loofbos, licht naalddhout en donker naalddhout. Voor de gebruikte parameters verwijzen we naar NHI (2008).

De gewasbestanden van het NHI geven slechts indicatie van de verschillen die tussen natuurlijke vegetaties kunnen optreden. De aan het NHI ontleende parameterwaarden stellen we hier echter niet ter discussie, maar gebruiken we om de klimaatafhankelijkheid van gewasfactoren te illustreren.

De gemeten meteorologische condities zijn die van De Bilt voor de periode 1976-2005. Op dagbasis gebruiken we:

- Minimale en maximale temperatuur (°C)
- Windsnelheid (m/s)
- Globale straling (kJ/m²)
- Absolute luchtvochtigheid (kPa)
- Neerslag (mm)

Voor de klimaatprojecties beschouwen we de KNMI'06 W en W+, met als referentiejaar 2050. Dertig jaar aan neerslag en verdampingsvariabelen voor de klimaatscenario's werden beschikbaar gesteld door het KNMI (Bakker en Bessembinder, 2011).

De tijdreeksen op dagbasis van 30 jaar lang gelden voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat voor de condities boven een referentiegrasland. Om de door ons gesimuleerde referentiegewasverdamping consistent te houden met de klimaatprojecties voor de referentieverdamping volgens Makkink uit de KNMI'06 scenario's, wordt de globale straling niet getransformeerd in de scenario's. We onderscheiden uiteindelijk drie scenario's: het huidige Nederlandse klimaat (H) en de KNMI'06 scenario's W en W+. De windsnelheid wordt voor alle scenario's gelijk gesteld aan die van het huidige klimaat.

Uit de verhouding tussen de SWAP-resultaten voor het referentiegewas en de 'werkelijke' potentiële verdamping van de vijf verschillende vegetatietypen, voor het huidige klimaat, leiden we maandelijkse *K*-waarden af (vergelijking [2]). Maandwaarden gebruiken we om de variatie binnen een jaar te laten zien, maar in principe kunnen *K*-waarden voor elke gewenste tijdstap worden bepaald.

Voor de *K*-waarden volgen we twee benaderingen:

- *K*-waarden zoals deze afgeleid worden uit metingen inclusief de interceptieterm (equivalent aan de *K*-waarden voor de Makkink-verdamping volgens Feddes (1987)). Deze *K*-waarde corrigeert impliciet voor E_s , E_t en E_i , ofwel de totale verdamping (E_{tot}), en wordt K_{tot} genoemd.
- *K*-waarden volgens de internationale definitie van de FAO (Allen e.a., 1998), welke alleen corrigeert voor transpiratie (E_t). Deze noemen we K_t .

Per definitie geldt de referentiegewasverdamping (E_{ref}) voor een grasveld, optimaal van water voorzien, maar met een droog bladerdek, dus zonder interceptieverdamping ($E_i = 0$). Daarnaast bedekt het gras de bodem volledig en wordt verondersteld dat de bodemverdamping verwaarloosbaar is ($E_s = 0$). De referentiegewasverdamping is daarom gelijk aan de potentiële transpiratie (E_{t-p}) van het referentiegrasland als er geen interceptie optreedt ($E_i = 0$). E_{ref} wordt niet rechtstreeks gemeten, maar berekend uit overige meteorologische variabelen. Eenzelfde benadering volgen we hier. Er geldt dus:

$$E_{ref} = E_{t-p_{refgrass}, E_i=0} \quad (3)$$

Afhankelijk van de wijze waarop een K -waarde is gedefinieerd, wordt E_{ref} omgezet in de potentiële totale verdamping (via K_{tot}) of in de potentiële transpiratie (via K_t) van een vegetatietype.

Een gewasfactor zoals die wordt afgeleid uit metingen van de totale verdamping E_{tot} corrigeert impliciet voor E_s , E_t en E_i :

$$K_{\text{tot}} = \frac{E_{\text{tot}}}{E_{\text{ref}}} \quad (4)$$

Wordt de internationale definitie van de K -waarde conceptueel zuiver doorgevoerd, dan geldt dat de K -waarde alleen corrigeert voor verschillen in transpiratie van een droog referentiegras (welke gelijk is aan E_{ref} , zie vergelijking [3]) en van een droog vegetatietype. Om de potentiële transpiratie van een droog gewas te bepalen (E_{t-p} , $I=0$), gebruiken we in SWAP de optie om te rekenen zonder geïntercepteerde hoeveelheid neerslag I (dus: $I=0$). Dit is van belang, omdat indien het blad bedekt is met interceptiewater, alle stralingsenergie dan gaat zitten in de verdamping van I , zodat de gewasweerstand gelijk aan nul wordt (Allen, 2005; Gavin en Agnew, 2000)). Er geldt:

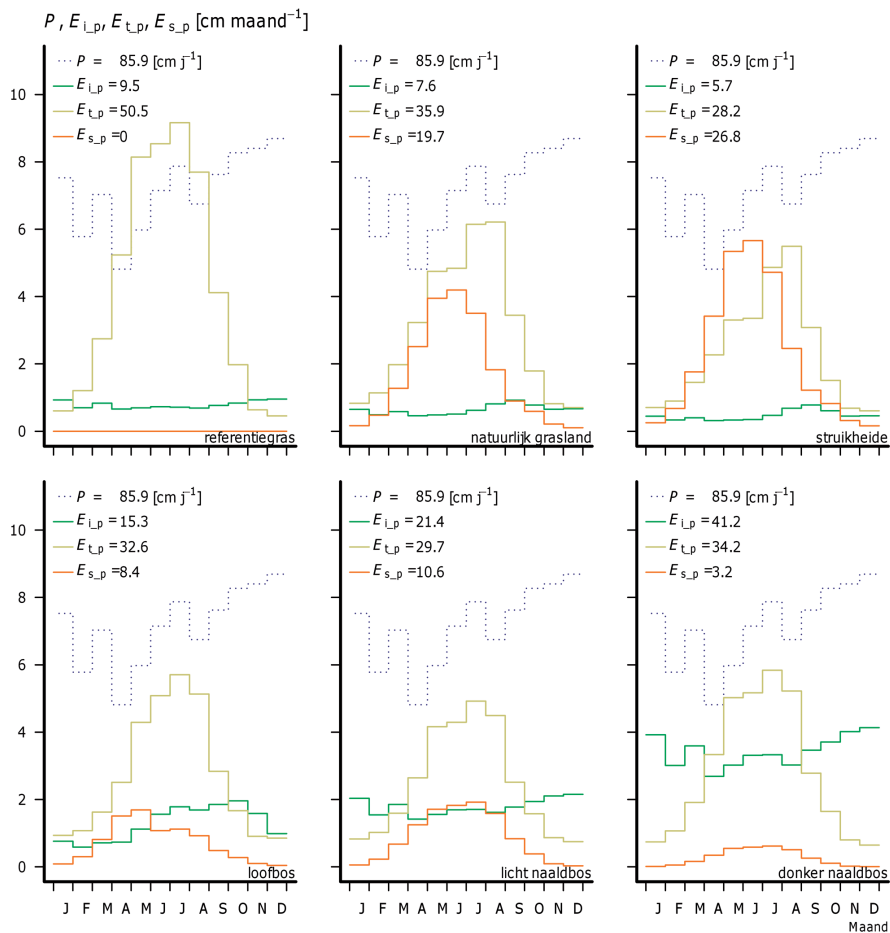
$$K_t = \frac{E_{t-p, I=0}}{E_{\text{ref}}} \quad (5)$$

K_t kan alleen worden gebruikt als E_s , I en E_i expliciet zijn gesimuleerd, evenals de invloed van I op E_t . Om K_t te gebruiken is voor dit onderzoek de modelcode van SWAP aangepast. E_{t-p} wordt eerst verkregen door vermenigvuldiging van E_{ref} met K_t (vergelijking [5]). E_{t-p} wordt vervolgens gereduceerd voor I , door aan te nemen dat de transpiratie nul is zolang er nog interceptiewater aanwezig is (als $I>0$, dan $E_t = 0$) en te veronderstellen dat het interceptiereservoir een openwaterverdamping heeft en aan het eind van de dag altijd weer leeg is (zie Kroes e.a. (2009); Van Walsum en Supit (2012) voor details). Voor SWAP-simulaties met K_{tot} geldt dat I niet gesimuleerd wordt, omdat de bijdrage van I in E_{tot} al is verdisconteerd in K_{tot} (vergelijking [4]).

Voor een uitgebreide beschrijving van de methode verwijzen we naar Bartholomeus en Witte (2013).

Resultaten

Afbeelding 1 geeft voor verschillende vegetatietypen P , E_{t-p} , E_{s-p} en E_{i-p} per maand (De Bilt), gemiddeld over de periode 1976-2005. P is vanzelfsprekend gelijk voor alle vegetaties. Voor het referentiegras wordt verondersteld dat $E_{s-p} = 0$, omdat deze de bodem volledig bedekt. Voor de andere vegetatietypen geldt dat de bodem niet volledig bedekt is en de Leaf Area Index LAI door het jaar heen verandert. Dit heeft effect op zowel E_{s-p} , E_{t-p} en E_{i-p} . Zo is E_{s-p} relatief hoog en E_{t-p} relatief laag bij een lage LAI en hiermee lage bodembedekking. E_{i-p} van gras en heide is aanzienlijk lager dan van bossen, zoals verwacht mocht worden. Een hoge E_{i-p} zorgt voor een relatief lage E_{t-p} , doordat tijdens interceptieverdamping de transpiratie uitgeschakeld is (zie methode).



Afbeelding 1: Componenten van de waterbalans (P = neerslag, E_{LP} = interceptieverdamping, E_{tp} = potentiële transpiratie, $E_{s,p}$ = potentiële bodemverdamping) voor een zestal vegetaties, berekend met SWAP en Penman-Monteith. Gewasbestanden zijn zoals gebruikt in het NHI (NHI, 2008); meteorologie van De Bilt, huidige klimaat (1976-2005).

Afbeelding 2 geeft tijdreeksen van de fout in $E_{tot,p}$ berekend met $K_{tot}K$ en K_t ten opzichte van de ‘werkelijke’ potentiële verdamping, zoals berekend met de Penman-Monteith ($E_{tot,p}(PM)$) vergelijking. De relatieve fout hebben we gedefinieerd als:

$$\text{relatieve fout} = \frac{E_{tot,p}(K)}{E_{tot,p}(PM)} - 1 \quad (6)$$

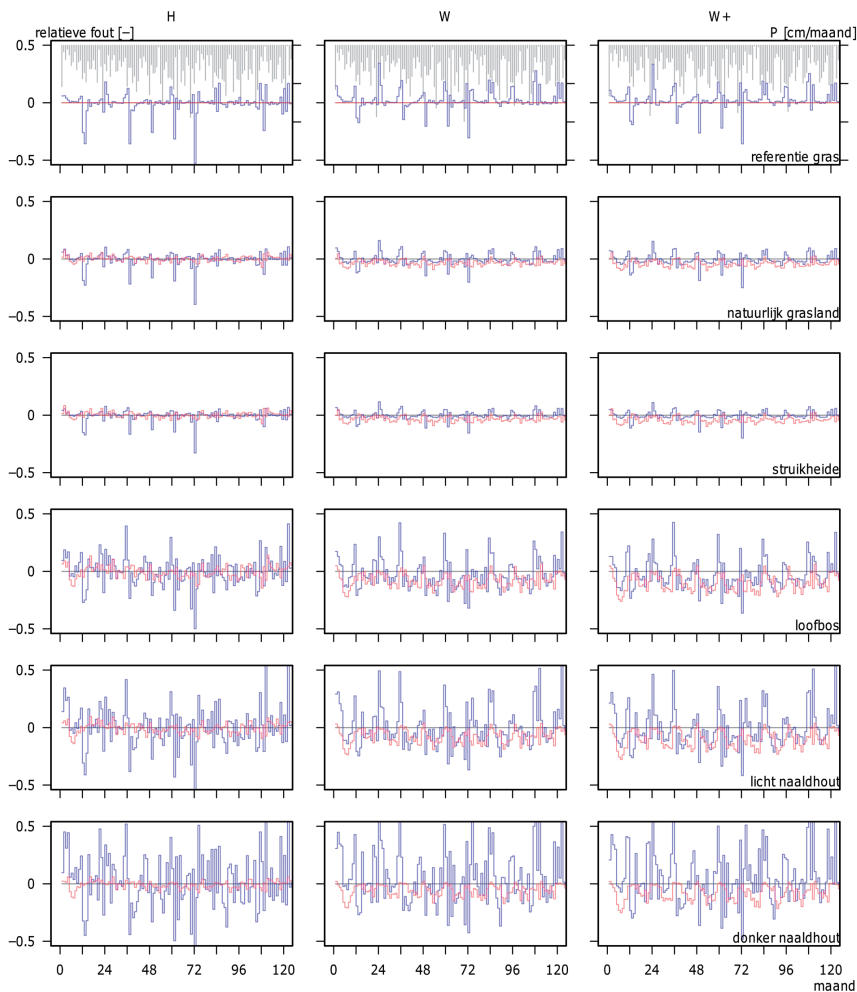
Waarbij een relatieve fout groter dan nul wijst op een overschatting van $E_{tot,p}$, en een relatieve fout kleiner dan nul op een onderschatting van $E_{tot,p}$.

Huidige klimaat

Voor het huidige klimaat voor Nederland ('H') zijn de resultaten voor K_t (rode lijn in 2)

zoals verwacht: $E_{\text{tot},p}$ bepaald met K_t en expliciete simulatie van E_i en $E_{s,p}$, is nagenoeg gelijk aan de werkelijke $E_{\text{tot},p}$ (2, kolom 'H'). De schommelingen rond de relatieve fout = 0 worden veroorzaakt doordat de simulaties zijn uitgevoerd op dagbasis, met 30-jaar gemiddelde gewasfactoren op maandbasis.

Voor K_{tot} (blauwe lijn) is de gemiddelde fout in $E_{\text{tot},p}$ klein, maar de uitschieters zijn groter dan bij K_t . Voor de berekening van $E_{\text{tot},p}$ betekent dit dat deze langjarig gemiddeld wel goed berekend wordt, maar dat in de tijd sprake is van grote onder- én overschattingen. Dit resultaat is in lijn met de bevindingen van Spijksma e.a. (1996), die melden dat de fout in de verdamping bij het gebruik van K_{tot} tientallen procenten kan bedragen. Deze fout zien we niet alleen bij bossen, maar ook bij korte vegetaties.



Afbeelding 2: Relatieve fout (vergelijking [6]) in maandwaarden van $E_{\text{tot},p}$ berekend met K_{tot} (blauw) en K_t (rood), voor de zes beschouwde gewassen voor het huidige Nederlandse klimaat ('H') en de scenario's W en W+. Slechts 10 jaar van de 30-jaar simulaties zijn getoond; K_{tot} en K_t zijn ontleend aan het huidige klimaat en toegepast in de klimaatprojecties. De bovenste rij geeft eveneens de maandelijks neerslag.

De fout is aanzienlijk lager bij het gebruik van K_t en expliciete simulatie van E_s en E_i . In de praktijk zal door onnauwkeurigheden in de berekening van E_s en E_i de fout in E_{tot_p} ook bij gebruik van K_t groter zijn dan hier gepresenteerd.

$E_{\text{tot}(K_{\text{tot}})}$ is, in tegenstelling tot K_t , sterk gecorreleerd aan neerslag, referentiegewas-verdamping en neerslagoverschot (resultaten in Bartholomeus en Witte (2013)), waardoor direct gebruik van K_{tot} ongeschikt is voor klimaatprojecties waarin deze variabelen veranderen. K_t lijkt hiervoor beter geschikt. Of dat inderdaad het geval is, toetsen we hierna door toepassing van K_{tot} en K_t in een drietal klimaatscenario's.

Klimaatscenario's

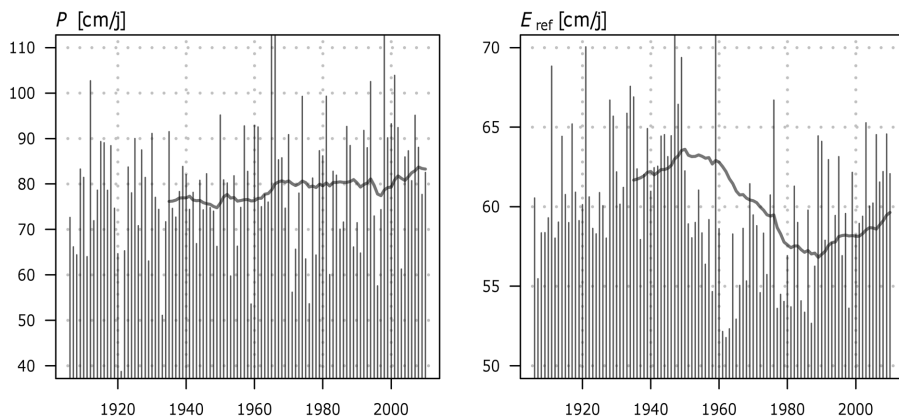
Als de gewasfactoren voor het huidige Nederlandse klimaat worden toegepast op het W en W+ scenario, blijkt dat de variatie in de relatieve fout in E_{tot} nagenoeg gelijk blijft (vergelijk de eerste kolom met de overige kolommen in 2). Wat opvalt echter, is dat E_{tot_p} in W en W+ systematisch wordt onderschat voor alle vegetaties wanneer deze wordt berekend uit K_t . In deze scenario's verandert de neerslagverdeling, en neemt de referentiegewasverdamping toe. De systematische fout wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in aerodynamische weerstand tussen de vegetaties en het referentiegewas (Allen e.a., 1998; Allen e.a., 2005), al zou dit effect voor humide gebieden niet groot moeten zijn (Allen e.a., 1998). Deze aerodynamische weerstand wordt in de Penman-Motheith vergelijking gebruikt.

Allen e.a. (1998) stellen een correctiefactor voor, om K_t voor het 'standaard' klimaat (in dit geval dus het huidige klimaat van De Bilt 1976-2005) te transformeren naar andere klimaten. Natuurlijke vegetaties zijn meestal hoger dan het referentiegewas en hebben daardoor een hogere aerodynamische ruwheid (en lagere aerodynamische weerstand). Doordat de aerodynamische ruwheid van natuurlijke vegetaties over het algemeen groter is dan die van het referentiegewas, zal de K_t -waarde voor zulke vegetaties meer dan bij het referentiegewas toenemen als de windsnelheid toeneemt en de relatieve luchtvochtigheid afneemt. Deze afwijking met het referentiegewas is volgens Allen e.a. (1998) uitsluitend afhankelijk van de hoogte van de vegetatie, en van verschillen in windsnelheid en minimale relatieve luchtvochtigheid tussen de klimaten. Een eenvoudige correctie van huidige gewasfactoren voor een ander klimaat blijkt echter, in tegenstelling tot het voorstel van Allen e.a. (1998), niet mogelijk te zijn (Bartholomeus en Witte, 2013).

Mocht nog verwacht worden dat met K_t de potentiële verdamping E_{tot_p} bepaald kan worden voor andere klimatologische omstandigheden (W en W+) dan waarvoor de gewasfactoren zijn afgeleid, dan blijkt deze verwachting dus onterecht, gezien de systematische onderschattingen van $E_{\text{tot}_p}(K_t)$. We moeten dus helaas concluderen dat, naast K_{tot} , die verandert door veranderingen in neerslagintensiteit, ook K_t niet klimaat-robust is.

Analyse periode 1906-2010

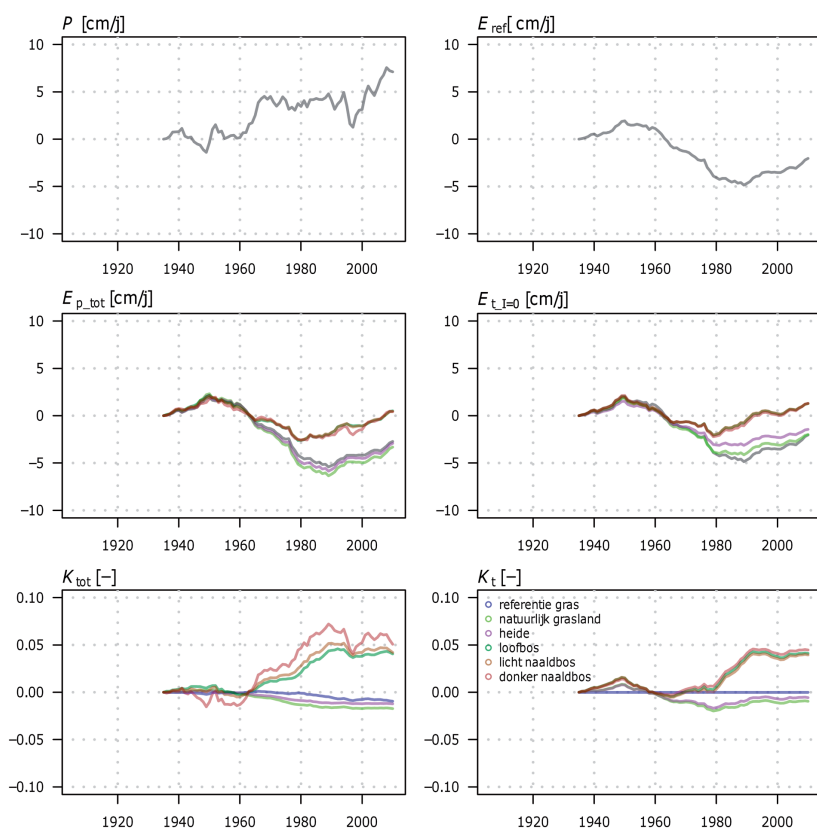
Gezien de klimaatafhankelijkheid van gewasfactoren is het interessant te analyseren hoe klimaatgemiddelde gewasfactoren in de loop van de tijd zijn veranderd. Zijn bijvoorbeeld gewasfactoren zoals afgeleid in de jaren 1980 nu nog wel toepasbaar?



Afbeelding 3: Jaarlijkse neerslag en referentiegewasverdamping voor de periode 1906-2010 voor De Bilt. De lijnen geven het 30-jaar (klimaatgemiddelde) terugschrijdende gemiddelde. De dalende trend in E_{ref} in de jaren 1950-1990 is mogelijk onder meer toe te schrijven aan het ('global dimming' (Roderick en Farquhar), het verschijnsel waarbij door stoffen in de atmosfeer de hoeveelheid licht die het aardoppervlak bereikt afnam. Door de verbeterde luchtkwaliteit is er sinds de jaren 1990 weer sprake van een omgekeerde trend.

Afbeelding 3 geeft de jaarlijkse neerslagintensiteit en referentiegewasverdamping voor de periode 1906-2010 voor De Bilt. Omdat globale straling niet voor deze hele periode gemeten is, is deze afgeleid uit de relatieve zonneshijnduur volgens Allen e.a. (1998). De 30-jaar (klimaatgemiddelde) terugschrijdend gemiddelde neerslagintensiteit laat een stijgende trend zien. De referentiegewasverdamping nam, na een stijging in de eerste helft van de vorige eeuw, af in de periode 1950-1980. De afgelopen 30 jaar laat weer een stijgende trend zien. Het dal tussen 1950-1980 hangt mogelijk onder meer samen met de uitstoot van fijne stofdeeltjes uit vliegtuigen die als condensatiekerntjes fungeren ('global dimming') (Roderick en Farquhar, 2002).

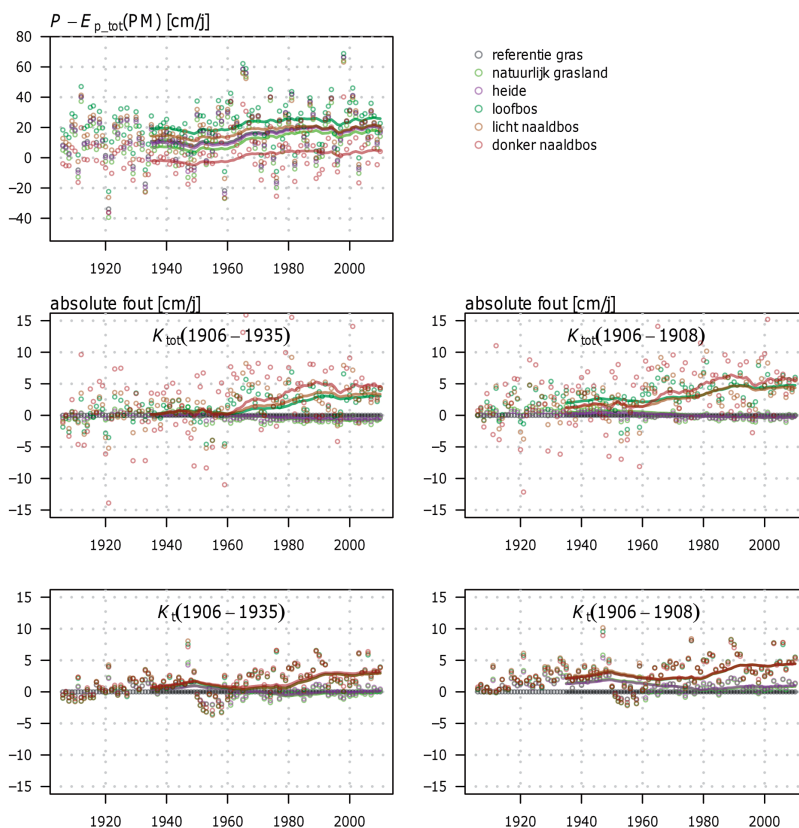
Afbeelding 4 laat dezelfde terugschrijdende gemiddelden zien, maar nu ten opzichte van de eerst berekende gemiddelde waarde (1906-1935). Behalve neerslag en referentie-gewasverdamping, laat deze figuur ook de klimaatgemiddelde totale potentiële verdamping E_{tot-p} en $E_{t-l=0}$, en klimaatgemiddelde waarden van K_{tot} en K_t zien. In K_t is het effect van vegetatiehoogte zichtbaar: K_{tot} voor bossen toont een sterk verband met neerslag en dus de interceptie, en binnen korte vegetaties zijn de verschillen gering.



Afbeelding 4: Terugschrijdende klimaatgemiddelde waarden van: jaarlijkse neerslag en referentiegewas-verdamping (boven), E_{p_tot} en E_t zonder interceptie ($E_{t, I=0}$) (midden), en K_{tot} en K_t (jaarwaarden) voor de periode 1906-2010 voor De Bilt en voor de zes beschouwde gewassen. Alle waarden zijn genormaliseerd naar de eerst berekende gemiddelde waarde (1936). De lijnen geven het 30-jaar (klimaatgemiddelde) terugschrijdende gemiddelde. In K_t is het effect van vegetatiehoogte zichtbaar: K_{tot} voor bossen toont een sterk verband met neerslag en dus de interceptie, en binnen korte vegetaties zijn de verschillen gering.

Door te normaliseren naar de waarden in 1936 zijn verschillen in veranderingen in de tijd tussen vegetatietypen duidelijk zichtbaar. Eenzelfde patroon als voor E_{ref} is te zien in de klimaatgemiddelde totale potentiële verdamping E_{tot_p} en $E_{tot_I=0}$, maar de trends zijn niet gelijk. Hieruit volgt dat veranderingen in E_{tot} en $E_{t, I=0}$ voor elk van de vegetaties niet gelijk zijn aan de veranderingen in de referentiegewasverdamping E_{ref} . Gevolg hiervan is dat zowel K_{tot} en K_t niet constant zijn; ze zijn afhankelijk van de klimatologische periode waarover ze worden bepaald. Dit betekent dat wanneer K -waarden worden gebruikt voor gemiddelde hydrologische condities in een bepaalde periode, K -waarden gebruikt moeten worden die zijn toegesneden op deze periode. Zowel de traditionele Nederlandse K -waarden, als die volgens de internationale definitie, zijn niet klimaatrobust.

Een voorbeeld van mogelijke effecten van fouten in K op de grondwateraanvulling is gegeven in afbeelding 5, waarbij het neerslagoverschot $P - E_{tot_p}$ is berekend met zowel Penman-Monteith als met K_{tot} en K_t . Hierbij hebben wij onderscheid gemaakt



Afbeelding 5: Jaarwaarden voor het neerslagoverschot ($P - E_{p_tot(PM)}$) voor de periode 1906-2005, De Bilt (boven). De onderste figuren geven de absolute fout ($(P - E_{p_tot(KC)}) - (P - E_{p_tot(PM)})$) van het gesimuleerde neerslagoverschot bij gebruik van K_{tot} en K_t bepaald over de periode 1906-1935 (klimaatgemiddeld) en over 1906-1908 (een praktisch te realiseren meetperiode van 3 jaar). De lijnen geven de 30-jaar (klimaat-gemiddelde) terugschrijdende gemiddelden. Voor beide K -definities geldt een systematische onderschatting van het neerslagoverschot. De absolute fout is groter voor K_{tot} dan voor K_t en groter voor K bepaald over 3 jaar dan over 30 jaar. Belangrijk is dat toepassing van K_t en expliciete simulatie van E_i voor bos geen oplossing is om het neerslagoverschot (en grondwateraanvulling) klimaatrobuust te simuleren.

naar de periode waarover K -waarden zijn bepaald. Een meetcampagne van 30 jaar, om klimaatgemiddelde waarden af te leiden, is praktisch nauwelijks haalbaar; in de praktijk meet men veelal slechts enkele jaren. In een eerdere studie hebben we aangetoond, dat het gebruik van te korte meetreeksen resulteert in systematische fouten in de relatie tussen vegetatie-eigenschappen en bodemvochtcondities. Door het gebruik van klimaatgemiddelde waarden, kunnen deze fouten geminimaliseerd worden (Bartholomeus e.a., 2008). Om het belang aan te tonen van het gebruik van klimaat-gemiddelde K -waarden voor hydrologische toepassingen, zijn K -waarden bepaald op basis van twee verschillende periodes:

- 1906-1935: representatief voor een klimaatgemiddelde periode van 30 jaar (zo lang wordt in de praktijk nooit gemeten);
- 1906-1908: representatief voor een meetcampagne van 3 jaar (realistische meetduur, past bijvoorbeeld in een promotieonderzoek).

Vervolgens zijn deze K -waarden toegepast voor verdampingsberekeningen over de periode 1906-2010. Deze simulaties geven inzicht in de toepasbaarheid van K -waarden in klimatologische condities van 50 tot 100 jaar in de toekomst; een analyse equivalent aan klimaatprojecties, met als verschil dat deze is uitgevoerd op basis van metingen in plaats van klimaatscenario's.

Voor beide K -definities geldt een systematische onderschatting van het neerslagoverschot. De absolute fout is groter voor K_{tot} dan voor K_t en groter voor K bepaald over 3 jaar dan over 30 jaar. Belangrijk is dat toepassing van K_t en expliciete simulatie van E_i voor bos geen oplossing is om het neerslagoverschot (en grondwateraanvulling) klimaatrobuust te simuleren.

Gebruik van klimaatgemiddelde K -waarden geeft goede resultaten voor de periode waarop K_t is gekijkt. Bovendien gaat het voor korte vegetaties (klimaat)gemiddeld eigenlijk heel goed: de gemiddelde fout is vrijwel nihil, al zijn er grote afwijkingen in bepaalde jaren (en dus is er het risico dat gepubliceerde factoren sterk afwijken van het gemiddelde). Voor bossen is de fout aanzienlijk. De fout bij K_{tot} is niet zo interessant, want nogmaals, het was al bekend dat interceptieverdamping voor bossen altijd expliciet gesimuleerd moet worden (Gerrits, 2009; Gerrits, 2010; Spieksma e.a., 1996). Dit is gedaan in de toepassing van klimaatgemiddelde K_t . Maar ook hier zijn er periodes met een fout van meer dan 5 cm/jaar bij alle bossen. Bij een neerslagoverschot van 29.6 tot 7.3 cm/jr (loofbos en donker naaldbos) is dat een afwijking van maar liefst 17-68%. Daarbij moet gerealiseerd worden dat deze factoren netjes zijn bepaald over een periode van 30 jaar. Een meer praktisch realiseerbare meetcampagne van 3 jaar levert een aanzienlijke stijging op van de absolute fout, die zelfs in enkele jaren 100% bedraagt voor donker naaldbos. Ook voor korte vegetaties neemt de fout toe wanneer de gewasfactor wordt bepaald over de korte periode van 3 jaar, al blijft deze beperkt. Kanttekening hierbij is dat niet alle 'korte vegetaties' op een representatieve wijze in de NHI schematisering lijken te zijn vertegenwoordigd. De categorieën 'natuurlijke graslanden' en 'heide' moeten wel bijzonder schraal en open zijn om de verschillende gesimuleerde verdampingsposten te kunnen verklaren. Bij rietlanden en ruigten, bijvoorbeeld, zullen de interceptie- en de transpiratieterm veel hoger zijn, waardoor de klimaatafhankelijkheid van hun gewasfactoren groter zal zijn.

De absolute fout die gemaakt wordt door verandering in K_t voor de door het NHI onderscheiden korte vegetaties op het klimaatgemiddelde neerslagoverschot is dus beperkt. Wel laat deze analyse de gevoeligheid van het gebruik van K_{tot} en K_t op het neerslagoverschot zien en de fout die gemaakt kan worden op de klimaatgemiddelde grondwateraanvulling. Beide definities van K geven geen bevredigende resultaten voor hydrologische simulaties van het historische Nederlandse klimaat. Gebruik van historische K -waarden voor toepassing in het huidige klimaat moet dan ook worden afgeraden, evenals de toepassing van K -waarden van het huidige klimaat voor klimaatprojecties.

Discussie

Met ons onderzoek hebben we op een conceptuele manier de bruikbaarheid van gewasfactoren onderzocht. Daarvoor genereerden we met SWAP en de Penman-Monteith



Afbeelding 6: Meetopstelling van de actuele verdamping. Verdampingsmetingen met lysimeters (links) worden via een thermische camera (midden en rechts) ruimtelijk opgeschaald. Duidelijk zichtbaar zijn temperatuurverschillen tussen vegetaties als gevolg van verschillen in verdamping. Zulke beelden zijn op termijn bedoeld om verdampingsschattingen uit satellietbeelden over grotere oppervlakten te iken. Foto: Bernard Voortman (KWR).

vergelijking synthetische reeksen van de potentiële verdampingstermen. Aan de absolute waarden van de aldus gesimuleerde componenten van de waterbalans moet beperkte waarde worden gehecht, onder andere omdat vraagtekens gezet kunnen worden bij de gebruikte verdampingseigenschappen van natuurlijke vegetaties. Zo lijkt de gesimuleerde interceptieverdamping van een donker naaldbos wel erg hoog, en die van natuurlijk grasland wel erg laag.

In het onderzoek zijn we uitgegaan van vaste gewaseigenschappen, welke niet veranderen onder invloed van de heersende klimatologische condities. De gevolgen van een hogere 'water use efficiency' door hogere atmosferische CO_2 -concentraties (Kruijt e.a., 2008), of van een afname van de bodembedekking door toegenomen droogtestress (Bartholomeus e.a., 2010; Bartholomeus e.a., 2012; Witte e.a., 2012), hebben we dus niet onderzocht. De in deze studie gesimuleerde verandering in K_t wordt dus niet veroorzaakt door de invloed van deze factoren op de transpiratie.

In principe kunnen gewasfactoren voor klimaatscenario's worden afgeleid. Ook gebruiken Allen e.a. (2005) complexere methodes (bijvoorbeeld de 'dual crop factor benadering') voor het afleiden van K -waarden, dan die algemeen worden toegepast voor Nederland. Het gebruik van K -waarden blijft echter gekunsteld en een bron van fouten. We menen daarom dat dit geen juiste en gewenste weg is om te bewandelen. Aangezien ook K_t ongeschikt is voor klimaatprojecties, kan beter geïnvesteerd worden in een goede procesmatige beschrijving van de verdamping, waarmee direct de potentiële verdamping van een begroeid oppervlak kan worden bepaald, bijvoorbeeld met SWAP, zoals we in het onderzoek hebben gebruikt. Met SWAP (of MetaSWAP (Van Walsum en Veldhuizen, 2011), dat meer geschikt is voor toepassing in grondwatermodellen met veel knopen/cellen), kan vervolgens ook de actuele verdamping worden gesimuleerd. Voor het beter parametriseren van vegetatie-eigenschappen zijn metingen vereist, waarbij ook de variatie in ruimte én tijd van de parameters wordt beschouwd.

Betrouwbare simulatie van de actuele verdamping en expliciete scheiding van actuele bodemverdamping, transpiratie en interceptieverdamping, zijn van belang om de effecten van veranderende (klimatologische) omstandigheden op de vegetatie te voorspellen. Zo bepaalt droogtestress, gedefinieerd als het verschil tussen potentiële en actuele transpiratie, de vegetatie-eigenschappen, zoals de bedekkingsgraad van de

bodem (Witte e.a., 2012). Dit heeft gevolgen voor de grondwateraanvulling, de dynamiek van de grondwaterstand, maar ook voor de nutriëntenhuishouding van de bodem. Expliciete beschouwing van de vegetatie is daarom nodig in hydrologische modellen, om een juiste schatting te maken van de hoeveelheid neerslag die bijdraagt aan bijvoorbeeld de grondwateraanvulling. Door de drinkwaterbedrijven is deze weg ingezet, door te investeren in onderzoek naar de actuele grondwateraanvulling, en het inzetten van een opstelling met lysimeters (afbeelding 6). De metingen uit deze lysimeters zijn een belangrijke aanzet om de berekende actuele verdamping te valideren aan meetgegevens voor natuurlijke vegetaties. Deze kunnen worden opgeschaald naar de resolutie die aansluit bij verdampingsbepalingen uit satellietbeelden zoals ETLook (Bastiaanssen e.a., 2012), en worden gebruikt ter validatie van de berekende verdamping met hydrologische modellen.

Conclusies

In deze studie onderzochten we of gewasfactoren (K -waarden), afgeleid voor de huidige en historische Nederlandse klimatologische condities, toepasbaar zijn onder andere klimatologische condities. Zowel de Nederlandse als de internationale definitie van gewasfactoren blijkt ongeschikt voor toepassing in klimaatprojecties. Ook in de afgelopen 100 jaar blijken gemiddelde K -waarden aanzienlijke variaties te hebben vertoond, of die nu worden berekend uit metingen over een realistische periode van 3 jaar of uit 30 jaar metingen. Het gebruik van K -waarden voor Nederland, zoals bepaald in het huidige klimaat kan daardoor systematische fouten in de berekende $E_{\text{tot},p}$ en het neerslagoverschot tot gevolg hebben. Als men in hydrologische modellen gebruik wil blijven maken van de gewasfactorbenadering, dan dienen de gepubliceerde K -waarden te worden aangepast aan de klimatologische condities waarvoor men berekeningen wil uitvoeren. Beter kan echter geïnvesteerd worden in een goede procesmatige beschrijving van de verdamping.

Literatuur

- Allen, R.G.** (2005) Penman-Monteith Equation; in: Hillel, D.J.L.H., D.S. Powlson, C. Rosenzweig, K.M. Scow, M.J. Singer, D.L. Sparks (red), Encyclopedia of soils in the environment. Elsevier Academic Press, Amsterdam, pp. 2119
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes en M. Smith** (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper, 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, D. Raes en J.L. Wright** (2005) FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions; in: Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol 1(2), pag 2-13
- Bakker, A. en J. Bessembinder** (2011) Integraal Waterbeheer - kritische zone & onzekerheden; NMDC-Innovatieproject, deelresultaat referentie meteo
- Bartholomeus, R.P., B. Voortman en J.P.M. Witte** (2010) De toekomstige grondwateraanvulling; in: H2O, vol 17, pag 35-37

- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte en J. Runhaar** (2012) Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations; in: *Ecohydrology*, vol 5(6), pag 808-818
- Bartholomeus, R.P. en J.P.M. Witte** (2013) Gewasfactoren en potentiële verdamping: geen klimaatrobuuste combinatie; Het gebruik van gewasfactoren in klimaatprojecties nader onderzocht. KWR rapport BTO 2013.211(s), Nieuwegein
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom en R. Aerts** (2008) The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation; in: *Journal of Vegetation Science*, vol 19, pag 799-808
- Bastiaanssen, W.G.M., M.J.M. Cheema, W.W. Immerzeel, I.J. Miltenburg en H. Pelgrum** (2012) Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model; in: *Water Resources Research*, vol 48(11), pag W11512
- Dolman, H., E. Moors, J. Elbers, W. Snijders en P. Hamaker** (2000) Het waterverbruik van bossen in Nederland. Alterra, Wageningen
- Doorenbos, J. en W.O. Pruitt** (1977) Crop water requirements; Irrigation and drainage paper No. 24, FAO, Rome
- Feddes, R.A.** (1987) Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration; in: Hooghart, C. (red), *Evaporation and weather. Proceedings and Information. Comm. Hydrological Research TNO*, The Hague, pp. 33-47
- Federer, C.A., C. Vörösmarty en B. Fekete** (1996) Intercomparison of Methods for Calculating Potential Evaporation in Regional and Global Water Balance Models; in: *Water Resour. Res.*, vol 32(7), pag 2315-2321
- Gavin, H. en C.T. Agnew** (2000) Estimating evaporation and surface resistance from a wet grassland; in: *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, vol 25(7-8), pag 599-603
- Gerrits, M.** (2009) Na regen komt interceptie... in: *Stromingen*, vol 15(1), pag 37-40
- Gerrits, M.** (2010) The role of interception in the hydrological cycle, Delft University of Technology, Delft, 126 pp
- Kroes, J.G., J.V. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs** (2009) SWAP version 3.2, Theory description and user manual; Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen
- Kruijt, B., J.P.M. Witte, C.M.J. Jacobs en T. Kroon** (2008) Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands; in: *Journal of Hydrology*, vol 349(3-4), pag 257-267
- Makkink, G.F.** (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters; in: *Journal of the institution of water engineers*, vol 11, pag 277-288
- NHI, N.H.I.** (2008) Modelrapportage; Deelrapport Gewassenmerken. Versie: NHI\FASE_1+\2008\DR12\v2
- NHV** (2002) Hydrologische woordenlijst; NHV-special, 5. Nederlandse Hydrologische Vereniging

- Roderick, M.L. en G.D. Farquhar** (2002) The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years; in: Science, vol 298(5597), pag 1410-1411
- Spieksma, J.F.M., A.J. Dolman en J.M. Schouwenaars** (1996) De parameterisatie van de verdamping van natuurterreinen in hydrologische modellen
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en J.G. Kroes** (2008) Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP; in: Vadose Zone Journal, vol 7(2), pag 640-653
- Van Walsum, P.E.V. en I. Supit** (2012) Influence of ecohydrologic feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios; in: Hydrology and Earth System Sciences, vol 16(6), pag 1577-1593
- Van Walsum, P.E.V. en A.A. Veldhuizen** (2011) MetaSWAP_V7_2_0. Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. Rapporten PBL/WOt
- Witte, J.P.M., J. Runhaar, R. van Ek, D.C.J. van der Hoek, R.P. Bartholomeus, O. Batelaan, P.M. van Bodegom, M.J. Wassen en S.E.A.T.M. van der Zee** (2012) An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for the Netherlands: bridging the gap between science and society; in: Hydrology and Earth System Sciences, vol 16(11), pag 3945-3957
- Zhou, M.C., H. Ishidaira, H.P. Hapuarachchi, J. Magome, A.S. Kiem en K. Takeuchi** (2006) Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin; in: Journal of Hydrology, vol 327(1-2), pag 151-173