



Gewasfactoren en potentiële verdamping: geen robuuste combinatie

Het gebruik van gewasfactoren in klimaatprojecties nader onderzocht

Februari 2013

Gewasfactoren en potentiële verdamping: geen robuuste combinatie

Het gebruik van gewasfactoren in klimaatprojecties
nader onderzocht

Februari 2013

© 2012 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Gewasfactoren en potentiële verdamping: geen robuuste combinatie

Het gebruik van gewasfactoren in klimaatprojecties nader onderzocht

Opdrachtnummer

B111698-001

Rapportnummer

BTO 2013.211(s)

Onderzoeksprogramma

PBC Bronnen

Projectmanager

JW Kooiman

Opdrachtgever

BTO

Kwaliteitsborger

Dr. ir. Willem Jan Zaadnoordijk

Auteurs

Dr. ir. Ruud P. Bartholomeus, Prof. dr. ir. Jan-Philip M. (Flip) Witte

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder PBG-hydrologie en is openbaar

Foto kaft

<http://hansbrongers.wordpress.com/>

Voorwoord

In dit rapport beschrijven we de toepasbaarheid van gewasfactoren voor het berekenen van de potentiële verdamping, in het bijzonder in afhankelijkheid van het klimaat. Een nauwkeurige bepaling van de potentiële verdamping in hydrologische modellen is van essentieel belang voor betrouwbare hydrologische berekeningen en voor een juiste schatting van de hoeveelheid grondwater die kan worden gewonnen zonder schade aan landbouw en natuur te veroorzaken. We hebben gestreefd naar een eenvoudige methode om de gewasfactoren, zoals afgeleid in de jaren 1980, geschikt te maken voor toepassing onder de huidige en toekomstige klimatologische condities. We moeten echter concluderen dat empirische gewasfactoren weliswaar zeer praktisch in gebruik zijn, maar dat een meer procesmatige aanpak nodig is om systematische fouten in hydrologische effectvoorspellingen te voorkomen. Dat geldt zowel voor voorspellingen onder het huidige klimaat, als voor analyses van klimaatscenario's.

De conclusie dat het gebruik van gewasfactoren met grote onzekerheden is omgeven is niet nieuw. Zo is menigmaal duidelijk gemaakt dat met gewasfactoren alleen de langjarig gemiddelde potentiële verdamping geschat mag worden; de temporele variatie in deze verdamping kan niet met gewasfactoren beschreven worden. In dit rapport komt deze bevinding opnieuw naar voren, maar we laten ook zien dat voor langjarig-(klimaat)-gemiddelde schattingen van de potentiële verdamping, de gewasfactorbenadering moet worden afgeraden.

We hopen dat dit rapport inzicht geeft in de algemene toepasbaarheid van gewasfactoren, en dat men onze conclusie deelt dat een meer procesmatige verdampingsberekening nodig is voor betrouwbare hydrologische effectvoorspellingen. Dat een dergelijke benadering ook mogelijk is, blijkt onder andere uit internationale ontwikkelingen in de hedendaagse (eco)hydrologie, waarin de wisselwerking tussen bodem, vegetatie en klimaat steeds meer aandacht krijgt. Samen met de waterbedrijven zijn we ook in Nederland deze weg ingeslagen. Hiervoor zijn we hen erkentelijk. Hopelijk kunnen we samen ook een vervolg geven aan dit onderzoek en aan de praktische toepassing van de resultaten.

Ten slotte bedanken we het KNMI voor het beschikbaar stellen van de klimaatprojecties van meteorologische variabelen die gebruikt zijn in dit onderzoek.

Ruud Bartholomeus en Flip Witte

Nieuwegein, 12 februari 2013

Samenvatting

Metingen en proceskennis vereist voor betrouwbare verdampingsberekening in grondwatermodellen

Samen met de neerslag, bepaalt de verdamping de hoeveelheid water die doorsijpelt naar het grondwater. Een betrouwbare bepaling van de verdamping in hydrologische modellen is daarom van belang voor betrouwbare simulaties van bijvoorbeeld de grondwateraanvulling en grondwaterstandsdynamiek. Dat geldt voor de heersende weerscondities, waarbij het effect van een waterhuishoudkundige maatregel moet worden berekend, maar ook voor scenarioanalyses zoals klimaatprojecties. Dit onderzoek toont aan dat het gebruik van empirische gewasfactoren voor het vaststellen van de potentiële verdamping, wat 'standaard' is in Nederlandse hydrologische modellen, systematisch onjuiste waarden oplevert. Vooral voor bossen kan de fout in het neerslagoverschot door gebruik van gewasfactoren tientallen procenten bedragen, zelfs als verdamping van interceptiewater expliciet wordt gesimuleerd. Investeren in meetgegevens en een verbeterde schematisering van de potentiële en actuele verdamping in hydrologische modellen is nodig voor betrouwbare hydrologische analyses. Zowel voor het huidige klimaat, als voor het klimaat van de (nabije) toekomst.

Belang: betrouwbare hydrologische effectvoorspellingen

Voor de drinkwaterbedrijven is een betrouwbare berekening van de grondwateraanvulling van belang. Ongeveer tweederde van het leidingwater dat de drinkwaterbedrijven in Nederland produceren, is immers onttrokken grondwater, water dat door grondwateraanvulling is ontstaan. Onttrekkingen op de stuwwallen zijn volledig afhankelijk van wat er vanuit de hemel uiteindelijk doorsijpelt naar het grondwater. Als we het KNMI mogen geloven zal het jaarlijkse neerslagoverschot in De Bilt onder het W+ scenario in 2050 met bijna 30% zijn gedaald (Hermans et al., 2009) en in de Amsterdamse Waterleidingduinen met 42% (Witte et al., 2008). Vooral de zomers worden veel droger. Wat deze verandering betekent voor de werkelijke grondwateraanvulling, valt met de huidige stand van kennis echter niet te zeggen.

In de meeste hydrologische modellen wordt de potentiële verdamping afgeleid uit de referentieverdamping via empirische gewasfactoren, waarbij de referentieverdamping wordt berekend uit routinematig ingewonnen meteorologische gegevens. In Nederland wordt de referentiegewasverdamping volgens Makkink op dagbasis beschikbaar gesteld door het KNMI. We hebben echter bedenkingen bij het gebruik van empirische gewasfactoren om de potentiële en vervolgens de werkelijke verdamping uit deze referentie te berekenen, met name op de hogere zandgronden en bij klimaatprojecties. Dit betekent dat volgens ons de effecten van natuurlijke variaties in het weer op de waterhuishouding en ecosystemen, niet goed kunnen worden voorspeld. Dit geldt nog meer voor de effecten van klimaatverandering. Een goede berekeningswijze is nodig voor een betrouwbare schatting van de (klimaatgemiddelde) grondwateraanvulling, nu, en onder het toekomstige klimaat. Het is immers de grondwateraanvulling die het hydrologische systeem aandrijft. Daarnaast is een nauwkeurige berekening van de grondwateraanvulling van groot belang voor het berekenen van de kwaliteit van het grondwater.

Aanpak: klimaatafhankelijkheid gewasfactoren conceptueel ontrafeld

Dat op korte temporele schaal, maanden tot jaren, schommelingen in gewasfactoren kunnen optreden is bekend en ook goed verklaarbaar. Een afhankelijkheid van het klimaat (dat is de weersgesteldheid over een periode van 30 jaar) ligt eveneens in de lijn der verwachtingen. In dit rapport hebben we, via een conceptuele benadering, de algemene geldigheid van het gebruik van klimaatgemiddelde gewasfactoren ontrafeld voor natuurlijke vegetaties in Nederland. Aanvankelijk hadden we als doel de huidige gewasfactoren geschikt te maken voor toepassing in klimaatprojecties. Daarvoor hebben we onderzocht of gewasfactoren, afgeleid voor de huidige en historische Nederlandse klimatologische condities en volgens zowel de Nederlandse als de internationale definitie, toepasbaar zijn onder andere klimatologische condities. We hebben ons daarbij gericht op de robuustheid van gewasfactoren van natuurlijke vegetaties en de onzekerheden die het toepassen van deze gewasfactoren genereert. Zowel

het historische klimaat (1906-2010) als enkele KNMI'06 klimaatscenario's (met 2050 als projectieperiode) zijn daarbij beschouwd.

Resultaat: gewasfactoren bron van systematische fouten, ook in het huidige klimaat

Uit dit onderzoek blijkt dat de huidige gewasfactoren voor het bepalen van de potentiële verdamping niet kunnen worden gecorrigeerd voor toepassing in klimaatscenario's. Sterker nog, het gebruik van empirische gewasfactoren moet niet alleen voor klimaatprojecties worden afgeraden, maar ook voor analyses onder het huidige klimaat. Uit onze simulaties van gewasfactoren op basis van meetgegevens van de afgelopen 100 jaar, blijkt namelijk dat empirisch vastgestelde gewasfactoren aanzienlijke variaties kunnen vertonen die afhangen van de geselecteerde meetperiode. Het gebruik van gewasfactoren voor Nederland, zoals bepaald in de jaren 1980, kan daardoor leiden tot systematische fouten in de berekende potentiële verdamping, zelfs onder het huidige klimaat.

Vervolgstappen: meten, modellen parametriseren en aansluiten bij internationale ontwikkelingen

In principe kunnen gewasfactoren voor klimaatscenario's modelmatig worden afgeleid. Het gebruik van gewasfactoren blijft echter gekunsteld en een bron van fouten. De vraag is daarom of dat de juiste en gewenste weg is om te bewandelen. Beter kan geïnvesteerd worden in goede procesmatige beschrijving van verdamping (bijvoorbeeld via de Penman-Monteith vergelijking) en deze via metingen te parametriseren voor vegetatie-eigenschappen en meteorologische condities. Hiermee wordt ook aangesloten bij internationale ontwikkelingen, waarin de wisselwerking tussen bodemvocht, vegetatie en atmosfeer steeds meer aandacht krijgt, en een groot aandeel van het onderzoek binnen de hedendaagse (eco)hydrologie vormt. Ook door de drinkwaterbedrijven is deze weg ingezet, door te investeren in dit onderzoek naar de actuele verdamping.

Bovendien hebben de waterbedrijven bijgedragen aan een meetinstallatie bestaande uit lysimeters in combinatie met een thermische infraroodcamera (BTO project B111800) (zie foto's). Deze meetopstelling is een belangrijke aanzet om de berekende verdamping te valideren aan meetgegevens voor natuurlijke vegetaties. Op termijn kunnen de meetgegevens worden opgeschaald naar de ruimtelijke resolutie die wordt gebruikt in verdampingsalgoritmen op basis van satellietbeelden (denk aan SEBAL), zodat deze kunnen worden geïjkt en gevalideerd. Tevens zijn de metingen te gebruiken voor de ijking en de validatie van de verdamping berekend met hydrologische modellen.

Ter vervanging van de benadering met gewasfactoren hebben de waterbedrijven al met al een begin gemaakt met een meer procesmatige aanpak, ondersteund door metingen in het veld.



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 ijken. Foto's: Bernard Voortman (KWR).

Inhoud

Voorwoord	i
Samenvatting	iii
Inhoud	v
1 Inleiding	1
2 Methode	3
2.1 Simulaties met het model SWAP	3
2.2 Afleiden gewasfactoren	4
2.3 Aanpassingen SWAP voor gebruik K_t	5
3 Resultaten en discussie	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Berekende K_{tot} en K_t	7
3.3 Toepassing K_{tot} en K_t bij de berekening van $E_{tot,p}$	10
3.4 Analyse klimaatafhankelijkheid gewasfactoren	14
3.5 Gewaseigenschappen en werkelijke verdamping	21
3.6 Klimaatprojecties	22
4 Conclusies en aanbevelingen	23
5 Referenties	25
I Bijlage: aanpassingen SWAP-code	27

1 Inleiding

De verdamping van het aardoppervlak (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 hydrologische modellen berekenen deze termen afzonderlijk (Bartholomeus et al., 2012). Eén van de belangrijkste invoervariabelen in hydrologische modellen is de potentiële verdamping (E_p) (Federer et al., 1996; Zhou et al., 2006). Hydrologische modellen berekenen de werkelijke (actuele) verdamping als een fractie van E_p , welke afhangt van de vochtcondities in de wortelzone. Samen met de neerslag, bepalen de potentiële en hiermee de werkelijke verdamping en de hoeveelheid water die doorsijpelt naar het grondwater, de grondwateraanvulling. Een betrouwbare bepaling van de potentiële verdamping is daarom van belang voor betrouwbare 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 et al., 1998; Doorenbos en Pruitt, 1977; Feddes, 1987) (Figuur 1), waarbij E_{ref} wordt berekend uit routinematig ingewonnen meteorologische gegevens. Voor E_p geldt dan:

$$E_p = K \cdot E_{\text{ref}} \quad [2]$$

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. Uit de internationale wetenschappelijke literatuur komt naar voren dat de Penman-Monteith aanpak de beste is voor het berekenen van de referentiegewasverdamping (Droogers, 2009; Itenfisu et al., 2003; Lu et al., 2005). De internationale standaard voor E_{ref} wordt dan ook berekend door de Penman-Monteith vergelijking te parametriseren voor gras of alfalfa (Allen et al., 1998).

Per definitie (Allen et al., 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 $E_{\text{ref_Mak}}$ zitten empirische constanten, welke $E_{\text{ref_Mak}}$ per definitie ongeschikt maakt voor klimaatprojecties. $E_{\text{ref_Mak}}$ geldt alleen voor de gemiddelde meteorologische condities die Makkink gebruikte voor zijn vergelijking.

Gewasfactoren voor Nederland zijn afgeleid uit waterbalansstudies, in het bijzonder van beregeningsexperimenten in het veld waarbij water is toegevoegd zodat het gewas potentieel verdampt (Feddes, 1987). Beregening 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 impliciet gecorrigeerd wordt voor het gecombineerde effect van bodemverdamping (E_s), transpiratie (E_t) en interceptieverdamping (E_i). Elk van deze factoren kan echter op een verschillende manier veranderen door veranderende klimatologische omstandigheden. Dit betekent dat gewasfactoren van Feddes (1987) alleen toegepast kunnen worden onder de gemiddelde meteorologische omstandigheden waarvoor ze zijn bepaald. Zo zullen door een veranderend neerslagpatroon, bijvoorbeeld in de vorm van meer intensieve neerslag, empirisch afgeleide gewasfactoren waarschijnlijk niet meer geldig zijn.

De gewasfactorbenadering van Feddes (1987) verschilt van die van de internationale standaard van de Food and Agriculture Organization FAO (Allen et al., 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 and E_t . Allen et al. (1998) geeft 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

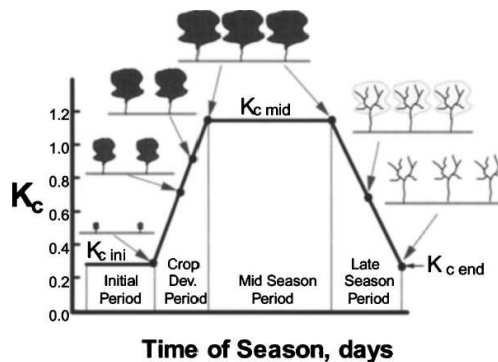
aanzienlijk beïnvloeden en het is, ook voor korte gewassen, daarom van belang de bijdrage van E_i expliciet te beschouwen.

De grote kracht van gewasfactoren is hun praktische toepasbaarheid. De nadelen ervan zijn echter evident. Zo vertrouwen gebruikers veelal op gepubliceerde K -waarden, in plaats van deze af te leiden voor het studiegebied. Echter, de empirische oorsprong van K -waarden beperkt de algemene toepasbaarheid, doordat de waarden slechts geldig zijn voor de omstandigheden waaronder deze bepaald zijn. Dit beperkt de mogelijkheid om K -waarden toe te passen op locaties waarvoor omgevingsfactoren, zoals het klimaat, afwijken van die waaronder de K -waarden zijn afgeleid (Farahani et al., 2007).

Allen et al. (1998) geven aan dat K -waarden niet klimaatrobuust zijn, in het bijzonder voor 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).

K -waarden zijn voornamelijk bepaald voor landbouwgewassen. Aan natuurlijke vegetaties is veel minder aandacht besteed. Spijksma et al. (1996) hebben in het kader van het Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging een studie uitgevoerd naar K -waarden van natuurlijke vegetaties. De potentiële verdamping, echter, is een onbruikbaar begrip voor droogteminnende vegetaties, omdat die van nature helemaal niet optimaal van water worden voorzien (als men dat wel zou doen, zou hun biomassa en soortensamenstelling veranderen). Gepubliceerde K -waarden voor zulke vegetaties zijn daarom meestal ontleend aan metingen van de actuele verdamping, of uit schattingen. Daarom zijn K -waarden voor droge vegetaties in de praktijk verhoudingsgetallen tussen de werkelijke verdamping (die bij droogte is gereduceerd) en de referentieverdamping. Net als K -waarden gelden die verhoudingsgetallen voor de tijdens de meting heersende weersomstandigheden. De veronderstelling achter de hydrologische rekenprocedure dat met die verhoudingsgetallen de potentiële verdamping wordt vastgesteld, is dus onjuist.

Dat op korte temporele schaal, maanden tot jaren, schommelingen in K -waarden kunnen optreden is bekend (Dolman et al., 2000; Spijksma et al., 1996) en gezien de hiervoor geschetste afhankelijkheid van K -waarden ook goed verklaarbaar. Een afhankelijkheid van de klimatologische gesteldheid ligt ook in de lijn der verwachtingen. In dit rapport ontrafelen we daarom, via een conceptuele benadering, de algemene geldigheid van het gebruik van klimaatgemiddelde K -waarden voor natuurlijke vegetaties voor het Nederlandse klimaat. We richten ons daarbij op de robuustheid van K -waarden 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 betrouwbaarheid van de zo berekende potentiële verdamping E_p .



Figuur 1: Curve voor gewasfactor K volgens de wereldvoedselorganisatie FAO met vier fases van gewasgroei (uit Allen et al. (2005)).

2 Methode

2.1 Simulaties met het model SWAP

Het SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant, (Kroes et al., 2009; Van Dam et al., 2008)) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP wordt gezien als het standaardmodel voor bepalen van actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens, gewas- en bodemgegevens (Feddes en Raats, 2004).

Het SWAP model geeft naast de mogelijkheid om referentieverdamping als invoer te gebruiken ook de optie om intern de potentiële verdamping te berekenen gebaseerd op Penman-Monteith (Van Dam et al., 2008). Vervolgens kan SWAP de potentiële verdamping berekenen, uitgaande het standaardreferentiegewas (aerodynamische weerstand = 70 s m^{-1} , gewashoogte = 12 cm, albedo = 0.23). Ook is het mogelijk niet uit te gaan van het standaardreferentiegewas, maar van de werkelijke gewasgegevens (gewasweerstand, hoogte en albedo) (Kroes et al., 2009). Deze laatste optie is in dit onderzoek gebruikt om de 'werkelijke' potentiële verdamping van verschillende vegetaties te simuleren. Voor een overzicht en uitgebreide beschrijving van SWAP en de berekening van E_t , E_s en E_i wordt verwezen naar Kroes et al. (2009).

Voor de analyse zijn we uitgegaan van de gewasbestanden zoals die in het Nationaal Hydrologische Instrumentarium NHI gebruikt worden voor de berekening van verdamping van begroeid oppervlak. In dit rapport beschouwen we alleen een referentiegrasland en vijf natuurlijke vegetaties (en dus geen akkerbouw): natuurlijk grasland, struikheide, loofbos, licht naaldhout en donker naaldhout. Voor de gebruikte parameters wordt verwezen naar NHI (2008), waarin de verdampingseigenschappen voor onze modellering met SWAP gegeven zijn. De aan het NHI ontleende parameterwaarden stellen we dus niet ter discussie, maar gebruiken we om de klimaatafhankelijkheid van gewasfactoren te onderzoeken.

De gebruikte meteorologische condities zijn die van De Bilt voor de periode 1976-2005. Op dagbasis zijn gebruikt:

- Minimale en maximale temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
- Windsnelheid (m/s)
- Globale straling (kJ/m^2)
- Absolute luchtvochtigheid (kPa)
- Neerslag (mm)

Voor de klimaatprojecties zijn de KNMI'06 W en W+ gebruikt, met als referentieperiode 2050. Neerslag en verdampingsvariabelen voor de klimaatscenario's zijn beschikbaar gesteld door het KNMI, gebruik makend van methodes die ontwikkeld zijn voor het Nationaal Data en Modellen Centrum NMDC (Bakker en Bessembinder, 2011). Zowel de gegevens voor het huidige als het toekomstige klimaat gelden voor de condities boven een referentiegrasland. Om de door ons gesimuleerde referentieverdamping consistent te houden met de klimaatprojecties voor de referentieverdamping volgens Makkink uit de KNMI'06 scenario's, is de globale straling niet getransformeerd in de scenario's.

Naast de meteorologische condities voor Nederland is gebruik gemaakt van condities in Groot Brittannië (<http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/>). We onderscheiden dus uiteindelijk vier scenario's: het huidige Nederlandse klimaat en de KNMI'06 scenario's W en W+, (respectievelijk H_NL, W_NL, W+_NL), en het huidige klimaat van Birmingham (H_UK). De windsnelheid is voor alle scenario's gelijk gesteld aan die van het huidige klimaat.

2.2 Afleiden gewasfactoren

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

- 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 et al., 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 is er geen bodemverdamping ($E_s=0$). De referentieverdamping is daarom gelijk aan de potentiële transpiratie ($E_{t,p}$) van het referentiegrasland, waarbij 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 :

$$K_{tot} = \frac{E_{tot}}{E_{ref}} \quad [4]$$

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 verg. [3]) en van een droog vegetatietype. Om de potentiële transpiratie van een droog gewas te bepalen ($E_{t,p, I=0}$), wordt in SWAP de optie gebruikt om de geïntercepteerde hoeveelheid neerslag I niet te beschouwen ($I=0$). Dit is van belang, omdat indien het blad bedekt is met interceptiewater de potentiële transpiratie nul is (de stomatale weerstand van een nat bladoppervlak is dan gelijk aan nul (Allen, 2005; Gavin en Agnew, 2000)). Er geldt:

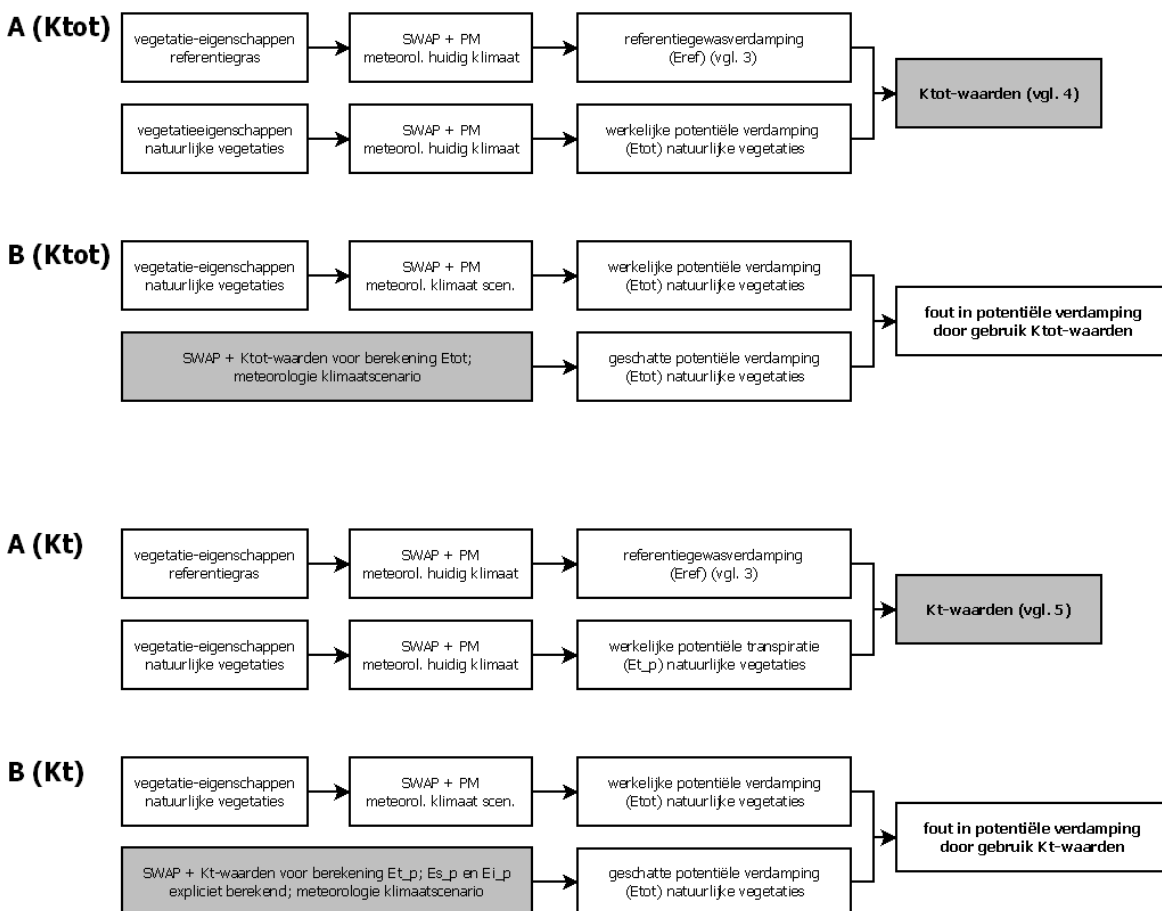
$$K_t = \frac{E_{t,p, I=0}}{E_{ref}} \quad [5]$$

Voor het gebruik van K_t geldt dat E_s , I en E_i expliciet moeten worden gesimuleerd, evenals de invloed van I op E_t . Opgemerkt moet worden dat de berekening van E_s en E_i ook onzekerheden zal introduceren; deze laten we hier buiten beschouwing.

We leiden hier maandelijkse K -waarden af voor klimaatgemiddelde omstandigheden (30 jaar) (Figuur 2A) en testen hoe robuust deze factoren zijn voor klimaatprojecties (Figuur 2B).

2.3 Aanpassingen SWAP voor gebruik K_t

Om K_t te gebruiken in SWAP, is voor dit onderzoek de modelcode aangepast (zie bijlage). E_s en E_i worden expliciet gesimuleerd. $E_{t,p}$ wordt eerst verkregen door vermenigvuldiging van E_{ref} met K_t (verg. [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 et al. (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 wordt meegenomen via K_{tot} (verg. [4]).



Figuur 2: Schematisch overzicht van de gevolgde procedure om K_{tot} - (boven) en K_t -waarden af te leiden uit modelsimulaties (A) en vervolgens de met K -waarden bepaalde totale potentiële verdamping voor klimaatprojecties te vergelijken met de gesimuleerde 'werkelijke' potentiële verdamping (B). PM=verdamping volgens Penman-Monteith.

3 Resultaten en discussie

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk geven we eerst de componenten van de waterbalans aan het landoppervlak, zoals bepaald door de meteorologische condities en de vegetatie: neerslag P , potentiële bodemverdamping $E_{s,p}$, potentiële transpiratie $E_{t,p}$ en interceptieverdamping $E_{i,p}$.

Vervolgens geven we op maandbasis de gewasfactoren K_{tot} en K_t , zoals afgeleid volgens respectievelijk vergelijking [4] en [5]. Deze verschillende definities van K -waarden passen we vervolgens toe om op dagbasis de totale potentiële verdamping $E_{tot,p}$ af te leiden. Dat doen we voor het huidige klimaat, maar ook voor de KNMI'06 klimaatscenario's W en $W+$ en het huidige klimaat van het binnenland van Engeland (Birmingham) (scenario's H_{NL} , W_{NL} , $W+_{NL}$ en H_{UK}). Door vergelijking met de via Penman-Monteith verkregen 'werkelijke' potentiële verdamping, krijgen we ten slotte inzicht in de fout van via K_{tot} en K_t afgeleide $E_{tot,p}$.

3.2 Berekende K_{tot} en K_t

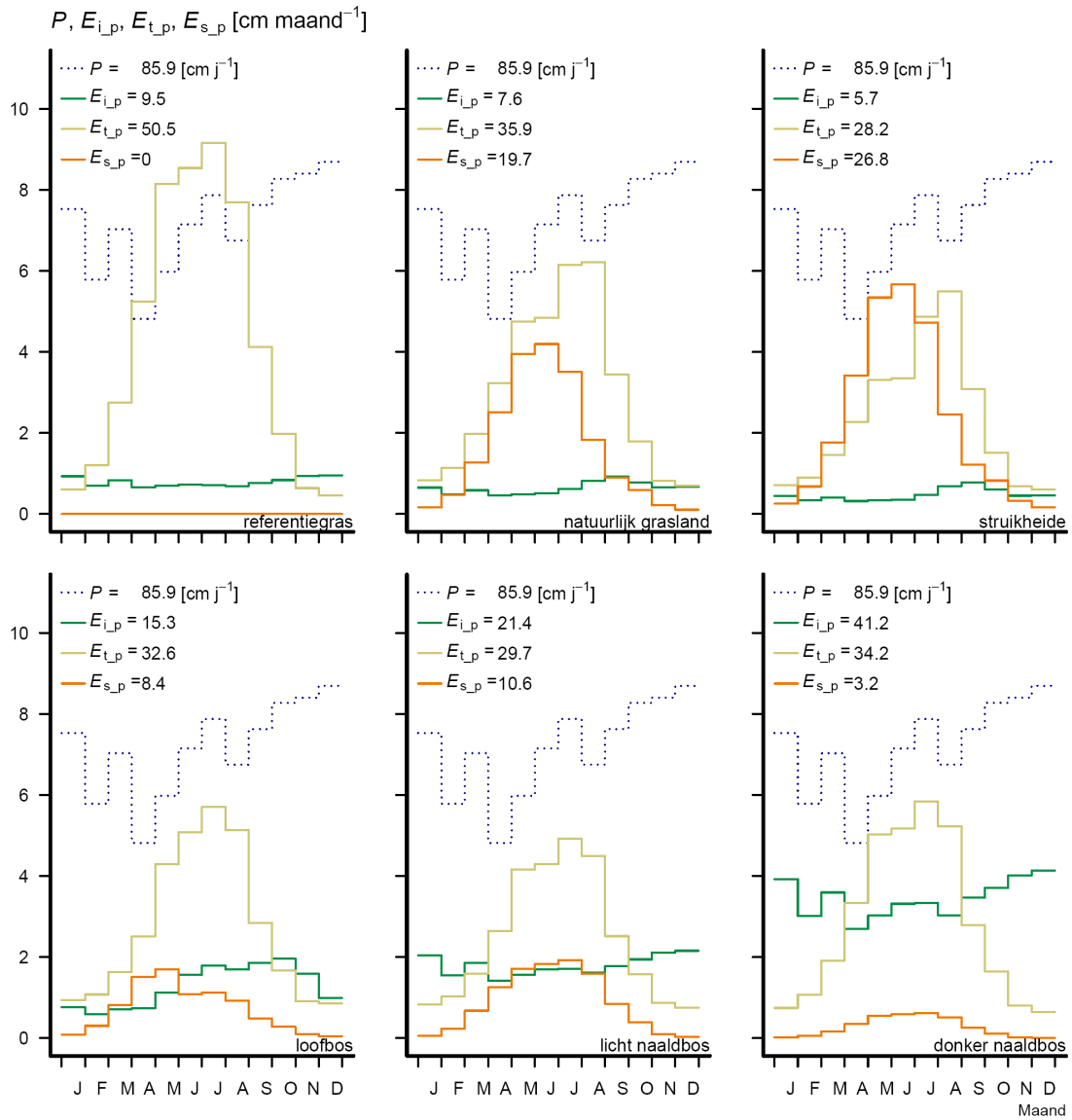
Figuur 3 geeft voor verschillende vegetatietypen P , $E_{t,p}$, $E_{s,p}$ en $E_{i,p}$ per maand (De Bilt), gemiddeld over de periode 1976-2005. P is vanzelfsprekend gelijk voor alle vegetaties. Per definitie geldt dat $E_{s,p} = 0$ voor het referentiegras, omdat deze de bodem volledig bedekt. Voor de andere vegetatietypen geldt dat de bodem niet volledig bedekt is en de Leaf Area Index LAI niet constant is. 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 reduceert (zie methode § 2.2).

Beseft moet worden dat de gewasbestanden slechts een indicatie geven van de verschillen die tussen verschillende natuurlijke vegetaties kunnen optreden. Binnen een vegetatietype kan er in werkelijkheid nog veel variatie bestaan. Tabel 1 geeft per vegetatie het percentage van de neerslag dat via interceptie verdampt en hiermee niet de bodem indringt. De gesimuleerde waarden zijn aannemelijk. Zo kan in vochtige en gematigde klimaten E_i 10 tot 50% van de jaarlijkse neerslag bedragen (Gerrits et al., 2007; Gerrits, 2009), kan voor bossen de E_i bijna even groot zijn als de (werkelijke) transpiratie (Tiktak en Bouten, 1994) en is E_i van landbouwgewassen en gras gemiddeld ongeveer 100 mm per jaar (Massop et al., 2005). Wel lijkt de gesimuleerde E_i van een donker naaldbos aan de hoge kant (zie ook Dolman et al. (2000)). Ook lijkt voor het natuurlijk grasland de bodemverdamping te hoog en de interceptieverdamping te laag: bij deze resultaten stellen we ons een droogteminnende en zeer korte vegetatie voor met veel kale grond, zoals een schraal duingrasland. Bij een natuurlijk grasland in natte en voedselrijkere beekdalen en moerassen, ligt een interceptieverdamping voor de hand die hoger is dan die van het standaardgrasland. Ook de struikheidevegetatie moet veel kale grond bevatten, om zo'n hoge bodemverdamping en zo'n lage interceptieverdamping te kunnen verklaren, maar zulke uitgevreten heidevegetaties komen wel voor.

Tabel 2 geeft de verhouding tussen de totale verdamping E_{tot} en de referentieverdamping E_{ref} , ofwel K_{tot} (vergelijking [4]). De hoge waarden voor K_{tot} voor de wintermaanden, zeker voor bossen, zijn een gevolg van de hoge interceptieverdamping E_i . Doordat E_i onderdeel uitmaakt van de 'gemeten' verdamping E_{tot} , maar per definitie niet van de referentiegewasverdamping E_{ref} , geldt ook voor de afgeleide K_{tot} van het referentiegrasland dat deze afwijkt van 1.

Tabel 3 geeft de verhouding tussen de potentiële transpiratie van een droog bladoppervlak $E_{t,p,I=0}$ en de referentieverdamping E_{ref} . Zoals het hoort volgens de internationale definitie (Allen et al., 1998) geldt voor het referentiegrasland $K_t = 1$. K_t corrigeert impliciet voor verschillen in LAI en bodembedekking tussen het referentiegewas en de werkelijke vegetatie. Wat in de K_t -waarden duidelijk naar voren komt is het effect van de bodembekking, via LAI , op $E_{t,p}$. Door de volledige bodembedekking van het referentiegrasland is in de zomermaanden $E_{t,p}$ van het referentiegrasland hoger dan van vegetaties met een lagere bedekking; een verschil dat in de wintermaanden nauwelijks van belang is door de lage

verdampingsvraag. Hierdoor is in de wintermaanden $K_t \approx 1$ en in de zomermaanden $K_t < 1$. Hieruit blijkt tevens dat voor verschillen in bedekkingsgraad ook via K_t -waarden wordt gecorrigeerd.



Figuur 3: Componenten van de waterbalans (P = neerslag, $E_{i,p}$ = interceptieverdamping, $E_{t,p}$ = 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).

Tabel 1: $E_{i,P}$ als percentage van P voor een referentiegras en vijf vegetatietypen uit het NHI (NHI, 2008); meteorologie van De Bilt, huidige klimaat (1976-2005).

maand	referentie gras	natuurlijk grasland	struikheide	loofbos	licht naaldbos	donker naaldbos
1	12.37	8.66	5.96	10.13	27.05	52.11
2	12.10	8.46	5.82	10.14	26.73	52.09
3	11.88	8.31	5.72	10.15	26.39	51.10
4	13.72	9.60	6.62	15.27	29.44	55.82
5	11.65	8.15	5.61	18.76	26.07	50.56
6	10.21	7.15	4.90	21.85	23.69	46.34
7	9.08	7.90	6.00	22.67	21.67	42.31
8	10.22	12.06	10.15	25.04	23.99	44.82
9	10.08	12.13	10.24	24.31	23.29	45.44
10	10.12	9.43	7.36	23.72	23.48	44.83
11	11.11	7.79	5.36	18.88	25.07	47.81
12	11.00	7.69	5.30	11.36	24.78	47.56
gemiddeld	11.13	8.94	6.59	17.69	25.14	48.40

Tabel 2: K_{tot} voor een referentiegras en vijf vegetatietypen uit het NHI (NHI, 2008); meteorologie van De Bilt, huidige klimaat (1976-2005). De hoge waarden in de winter worden veroorzaakt door het aandeel van interceptieverdamping op de totale verdamping.

maand	referentie gras	natuurlijk grasland	struikheide	loofbos	licht naaldbos	donker naaldbos
1	1.50	1.60	1.37	1.74	2.84	4.55
2	1.18	1.30	1.18	1.22	1.73	2.56
3	1.09	1.17	1.10	0.96	1.26	1.73
4	1.03	1.09	1.05	0.83	0.93	1.12
5	1.02	1.06	1.04	0.82	0.86	0.99
6	1.02	1.05	1.03	0.85	0.86	1.00
7	1.01	1.06	1.03	0.88	0.88	1.01
8	1.02	1.07	1.05	0.94	0.93	1.06
9	1.04	1.12	1.08	1.10	1.09	1.38
10	1.10	1.24	1.15	1.53	1.53	2.13
11	1.41	1.52	1.31	2.33	2.75	4.35
12	1.68	1.76	1.47	2.25	3.50	5.71

Tabel 3: K_t voor een referentiegras en vijf vegetatietypen uit het NHI (NHI, 2008); meteorologie van De Bilt, huidige klimaat (1976-2005). $K_t = 1$ voor het referentiegras, wat volgens de definitie ook zo hoort. K_t corrigeert alleen voor de potentiële transpiratie van een gewas met een droog bladopperrolak. K_t corrigeert impliciet voor verschillen in LAI en bodembedekking tussen het referentiegras en de werkelijke vegetatie, dat de lage waarden in de zomer verklaart. E_s neemt bij lagere bedekking wel toe, waardoor het van groter belang is E_s goed te berekenen.

maand	referentie gras	natuurlijk grasland	struikheide	loofbos	licht naaldbos	donker naaldbos
1	1.00	1.05	0.85	1.01	1.03	1.09
2	1.00	0.82	0.62	0.71	0.74	0.87
3	1.00	0.66	0.48	0.52	0.54	0.72
4	1.00	0.59	0.41	0.45	0.49	0.66
5	1.00	0.57	0.39	0.52	0.51	0.65
6	1.00	0.55	0.38	0.59	0.50	0.64
7	1.00	0.66	0.52	0.63	0.54	0.68
8	1.00	0.81	0.71	0.67	0.58	0.72
9	1.00	0.84	0.74	0.69	0.60	0.74
10	1.00	0.84	0.69	0.78	0.73	0.86
11	1.00	0.98	0.78	1.03	1.04	1.13
12	1.00	1.15	0.94	1.19	1.21	1.24

3.3 Toepassing K_{tot} en K_t bij de berekening van E_{tot_p}

Figuur 4 geeft tijdreeksen van de relatieve fout in E_{tot_p} berekend met K_{tot} en K_t in vergelijking tot de relatieve fout in de ‘werkelijke’ potentiële verdamping, zoals berekend met de Penman-Monteith ($E_{tot_p}(PM)$) vergelijking. De relatieve fout is 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} . Figuur 5 geeft de relatieve fout als boxplots, waarmee een beter beeld wordt gegeven van de verdeling (mediaan, onder- en overschatting) van deze fout.

Huidige klimaat

Voor het huidige klimaat voor Nederland ('H_NL') zijn de resultaten voor K_t (rode lijn in Figuur 4) zoals verwacht mocht worden: E_{tot_p} zoals bepaald met K_t en expliciete simulatie van E_i en E_{s_p} , is nagenoeg gelijk aan de werkelijke E_{tot_p} (Figuur 4 en Figuur 5, kolom 'H_NL'). 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_{tot_p} klein, maar de uitschieters zijn groter dan bij K_t . Voor de berekening van E_{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 et al. (1996), die melden dat de fout in de verdamping bij het gebruik van K_{tot} tientallen procenten bedragen. Deze fout zien we niet alleen bij bossen, maar ook bij korte vegetaties. De fout is aanzienlijk lager bij het gebruik van K_t en expliciete simulatie van E_s en E_i . Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er impliciet vanuit gegaan wordt dat E_s en E_i correct berekend worden. 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.

De relatieve fout in $E_{tot_p}(K_{tot})$ laat een verband zien met de neerslagintensiteit P en met de referentieverdamping E_{ref} (Figuur 6). De relatieve fout voor $E_{tot_p}(K_{tot})$ is vooral groot in periodes met een neerslagoverschot ($P - E_{tot_p}(PM) > 0$), waarin overigens juist de grondwateraanvulling plaatsvindt; dan kan de fout tientallen procenten bedragen. De relatie tussen de relatieve fout in $E_{tot_p}(K_{tot})$ en $P - E_{tot_p}(PM)$ is significant (lineaire regressie, statistieken niet getoond). Voor korte vegetaties is de fout bij een neerslagtekort, ofwel gedurende de zomermaanden, te verwaarlozen, maar bij hoge vegetaties beslist niet; dan wordt E_{tot_p} systematische overschat. In het algemeen gesteld wordt $E_{tot_p}(K_{tot})$ dus algemeen systematisch overschat (relatieve fout > 0) in maanden met weinig neerslag, en systematisch onderschat voor maanden met veel neerslag; de relatieve fout neemt uiteraard af met een toenemende verdampingsvraag (hoge E_{ref}). Gebruik van K_{tot} zorgt dus voor grote fouten bij hele droge, of hele natte perioden. Doordat zowel onder- als overschatting plaatsvindt, kan de 30-jaar gemiddelde fout wel niet zo groot zijn, maar de dynamiek (zelfs op maandbasis) kan behoorlijk misgaan.

Voor $E_{tot_p}(K_t)$ treden zulke systematische afwijkingen niet of nauwelijks op; alleen voor bossen kan een kleine systematische onderschatting van $E_{tot_p}(K_t)$ bij een groot neerslagtekort worden onderscheiden. Het verband tussen de relatieve fout in $E_{tot_p}(K_t)$ en $P - E_{tot_p}(PM)$ (Figuur 6) is veel minder sterk dan voor het verband tussen $E_{tot_p}(K_{tot})$ en $P - E_{tot_p}(PM)$, maar is wel significant (lineaire regressie, statistieken niet getoond).

Doordat $E_{tot_p}(K_{tot})$ sterk is gecorreleerd aan neerslag, referentieverdamping en neerslagoverschot (Figuur 6), zal K_{tot} ongeschikt zijn voor klimaatprojecties waarin deze variabelen veranderen. Op basis van Figuur 6 lijkt K_t , daarentegen, hiervoor beter geschikt. Dit is getoetst door toepassing van K_{tot} en K_t in een drietal klimaatscenario's, zoals hierna besproken.

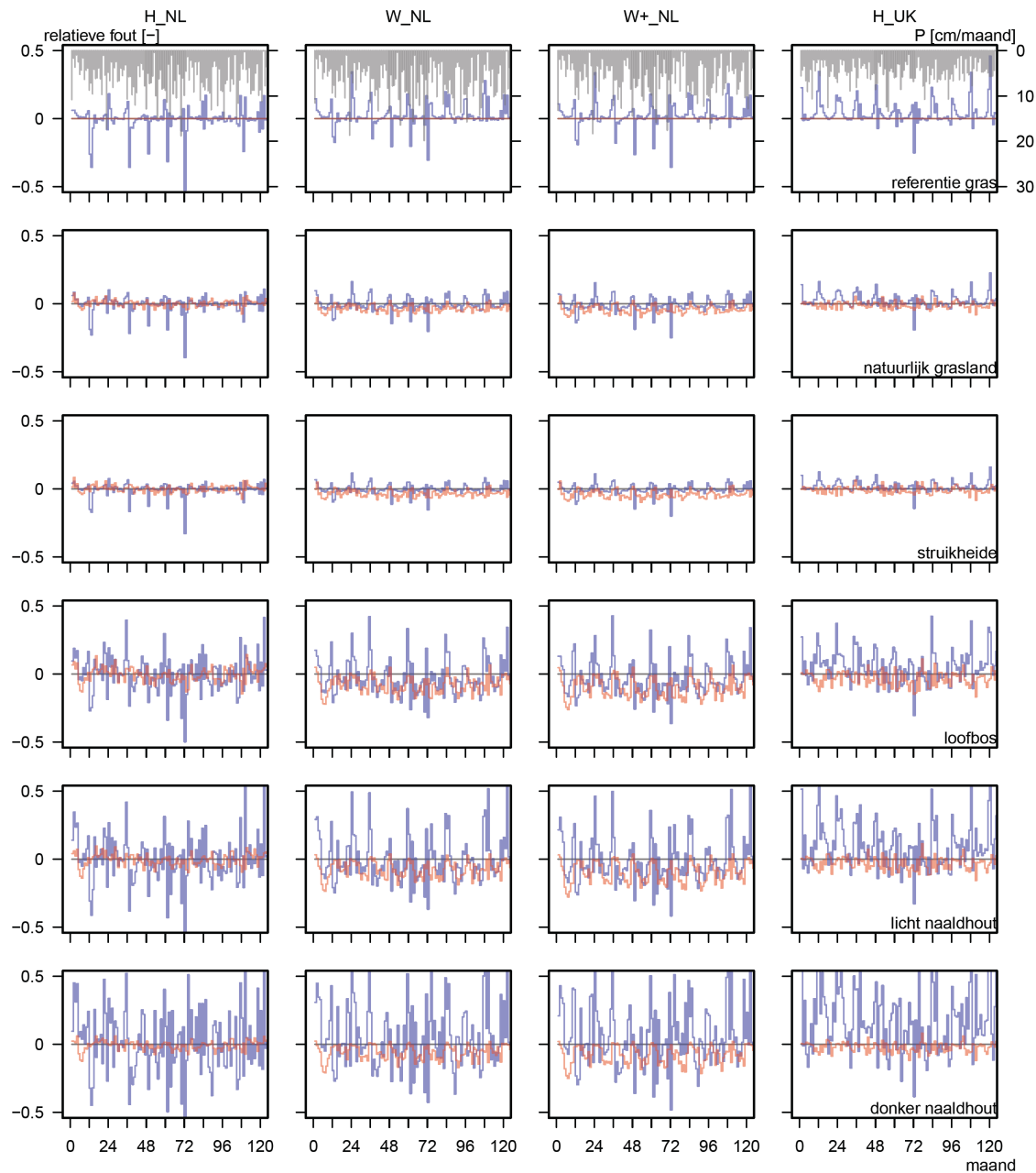
Klimaatscenario's

Als de gewasfactoren voor het huidige Nederlandse klimaat worden toegepast op het W en W+ scenario, en op het huidige klimaat van het binnenland van Engeland (scenario 'H_UK'), blijkt dat de variatie in de relatieve fout in E_{tot} nagenoeg gelijk blijft (vergelijk eerste kolom met de overige kolommen in Figuur

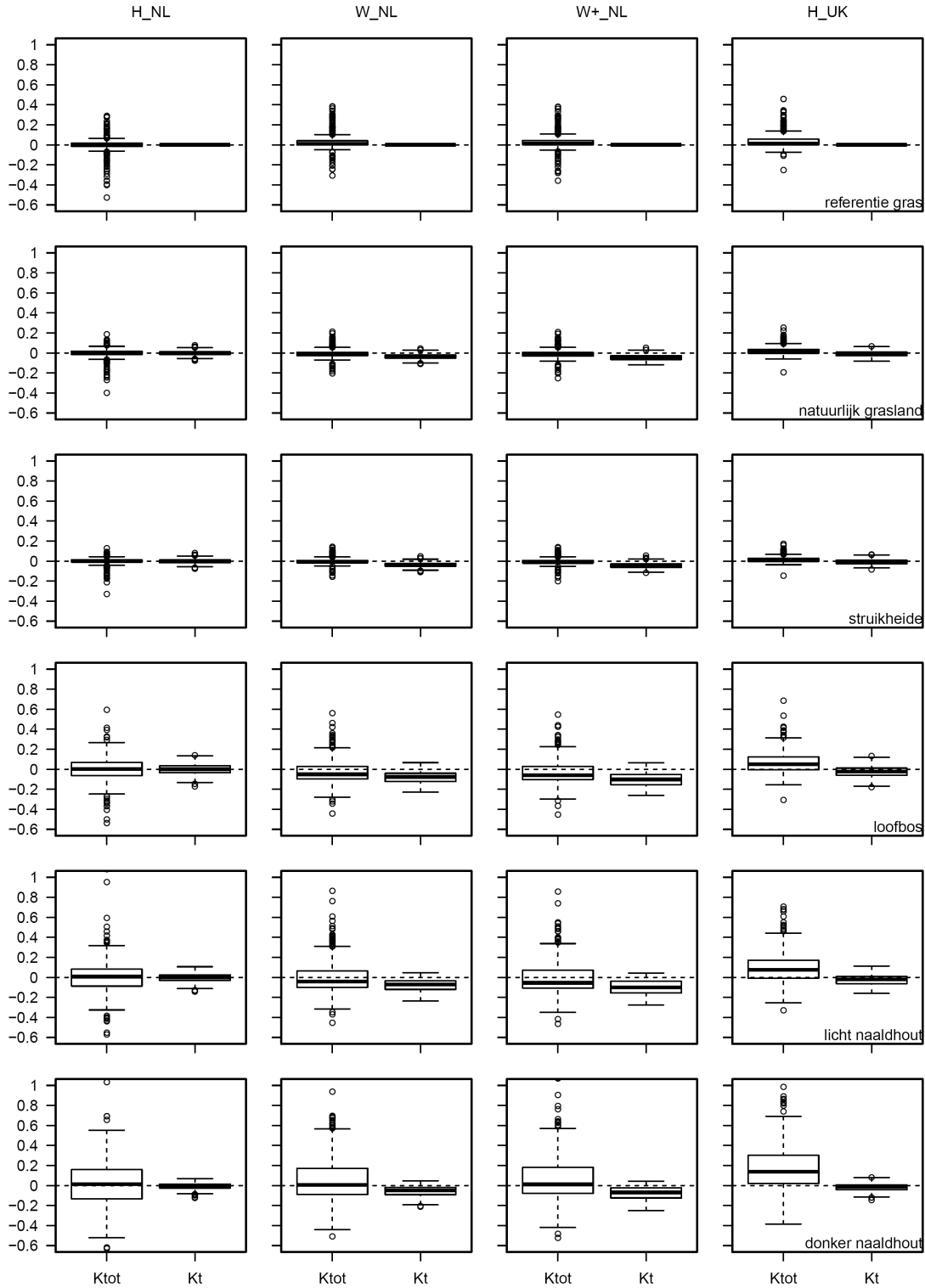
5). Wat opvalt echter, is dat E_{tot_p} in W en W+ systematisch wordt onderschat voor alle vegetaties wanneer deze wordt berekend uit K_t . In deze scenario's verandert de neerslagverdeling, en neemt de referentieverdamping toe. De systematische onderschattingen kunnen niet worden verklaard uit de correlaties uit Figuur 6, simpelweg omdat er voor $E_{\text{tot}_p}(K_t)$ voor het huidige klimaat geen systematische afwijkingen in $E_{\text{tot}_p}(K_t)$ optreden en de relatieve fout in $E_{\text{tot}_p}(K_t)$ nauwelijks is gecorreleerd aan neerslag en verdamping. De systematische fout wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in aerodynamische weerstand tussen de vegetaties en het referentiegewas (Allen et al., 1998; Allen et al., 2005), al zou dit effect voor humide gebieden niet groot moeten zijn (Allen et al., 1998). Deze aerodynamische weerstand wordt in de Penman-Motheith vergelijking gebruikt. Hierop komen we terug in de paragraaf 3.4 'Analyse klimaatafhankelijkheid gewasfactoren'.

Voor scenario 'H_UK', dat aanzienlijk minder neerslag kent en nagenoeg dezelfde referentieverdamping als 'H_NL', is er geen systematische onderschatting voor $E_{\text{tot}_p}(K_t)$. Door de lagere neerslagintensiteit ontstaat wel een systematische overschatting van $E_{\text{tot}_p}(K_{\text{tot}})$, wat consistent is met de correlaties tussen de relatieve fout en het neerslagoverschot in Figuur 6.

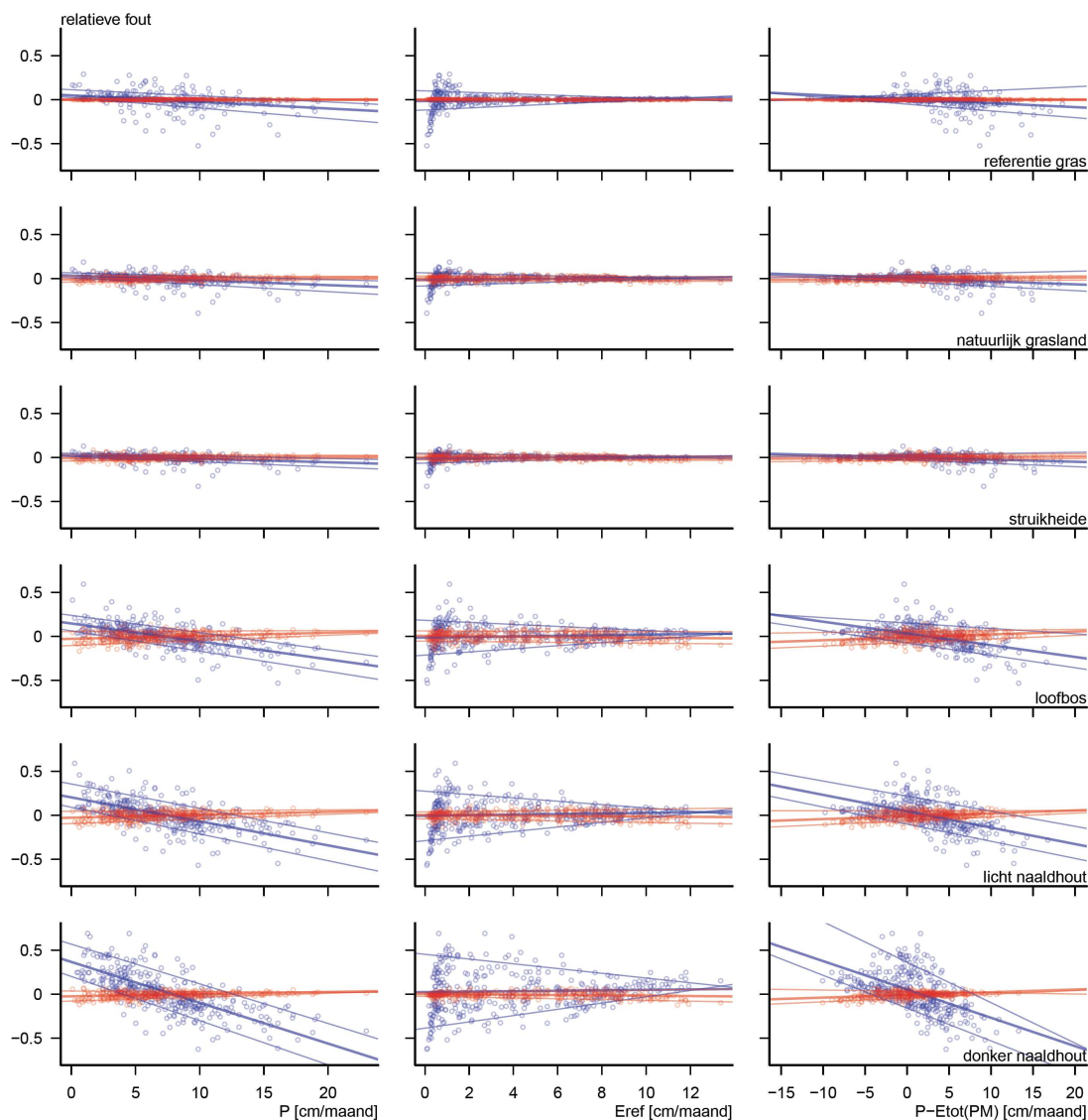
Mocht op basis van de correlaties in Figuur 6 nog verwacht worden dat met K_t de potentiële verdamping E_{tot_p} bepaald kan worden voor andere klimatologische omstandigheden (W, W+, UK), dan blijkt deze verwachting dus onterecht, gezien de systematische onderschattingen van $E_{\text{tot}_p}(K_t)$. We moeten dus helaas concluderen dat, naast K_{tot} , die verandert door veranderingen in neerslagintensiteit, ook K_t niet klimaatrobust is. Dat komt doordat de potentiële transpiratie van de verschillende vegetaties een andere respons vertoont op de scenario's dan het referentiegewas.



Figuur 4: Relatieve fout (verg. [6]) in maandwaarden van $E_{tot,p}$ berekend met K_{tot} (blauw) en K_t (rood), voor het huidige Nederlandse klimaat ('H_NL') en de scenario's W, W+ en UK. Slechts 10 jaar van de 30-jaar simulaties zijn getoond; K_{tot} en K_t ontleend aan het huidige klimaat.



Figuur 5: Boxplots van de relatieve fout (verg. [6]) in maandwaarden van $E_{tot,p}$ berekend met K_{tot} en K_t , voor het huidige Nederlandse klimaat ('H_NL') en de scenario's W, W+ en UK. Voor licht en donker naaldhout geldt dat niet de volledige plots zijn gegeven; de uitbijters zijn groter dan het bereik van de verticale as (voor K_{tot}). K_{tot} en K_t ontleend aan het huidige klimaat.



Figuur 6: Relatieve fout (verg. [6]) in maandwaarden van $E_{tot,p}$ berekend met K_{tot} (blauw) en K_t (rood), als functie van de neerslag (P), referentieverdamping (E_{ref}) en het neerslagoverschot ($P-E_{tot,p}(PM)$) voor De Bilt, 1976-2005. De lijnen geven de lineaire regressielijnen (dik) en de 10 en 90% regressiequantielen, welke een trend in het verloop van de maximale onder- en overschatting van $E_{tot,p}$ weergeven; 80% van de gesimuleerde waarden ligt tussen deze lijnen. K_{tot} en K_t ontleend aan het huidige klimaat.

3.4 Analyse klimatafhankelijkheid gewasfactoren

Algemeen

Bij aanvang van deze studie was de hypothese dat gewasfactoren niet klimaatrobuust zijn doordat met klimaatverandering de verdeling van de neerslag over het jaar verandert. Deze verwachting blijkt te zijn uitgekomen bij de toepassing van K_{tot} , al zijn de systematische fouten in de berekende $E_{tot,p}$ voor korte vegetaties gering (Figuur 5). Echter, ook als alleen gewasfactoren voor transpiratie worden gebruikt, dus K_t , en bodem- en interceptieverdamping expliciet worden gesimuleerd, blijkt dat er systematische fouten optreden, ook voor het humide Nederlandse klimaat. Kennelijk werkt een procentuele verandering in de referentieverdamping, zoals gepresenteerd in de KNMI'06 scenario's, niet 1:1 door in de potentiële

verdamping van andere vegetaties. Dit heeft tot gevolg dat gewasfactoren aangepast moeten worden aan het klimaatscenario. Dit geldt voor zowel K_{tot} als K_t .

Analyse klimaatscenario's

Om de afhankelijkheid van K van het klimaat verder te onderzoeken, zijn gewasfactoren afgeleid voor het W, W+ en UK scenario, gebaseerd op de 'werkelijke' verdamping berekend met SWAP en Penman-Monteith (equivalent aan de procedure zoals gevolgd voor het huidige klimaat). Figuur 7 laat zien dat K_{tot} lager is voor alle scenario's dan de K_{tot} voor het huidige klimaat, al zijn de verschillen voor korte vegetaties beperkt. K_t is systematisch hoger voor W en W+, wat overeenkomt met de systematische onderschatting van $E_{tot,p}$ voor alle vegetaties van deze scenario's in Figuur 4 en Figuur 5 (die gebaseerd zijn op K -waarden ontleend aan het huidige klimaat). Voor UK treden geen systematische verschillen in K_t op, wat in overeenstemming is met de goede voorspelling van $E_{tot}(K_t)$ (Figuur 4 en Figuur 5).

Passen we nu de voor ieder scenario afgeleide K_t toe om $E_{tot,p}$ onder de klimaatscenario's te bepalen, dan verdwijnen de systematische fouten zoals die optreden in Figuur 4 en Figuur 5 (resultaten niet getoond).

Allen et al. (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 et al. (1998) uitsluitend afhankelijk van de hoogte van de vegetatie, en van verschillen in windsnelheid en minimale relatieve luchtvochtigheid tussen de klimaten. De windsnelheid is in de analyse voor alle klimaten gelijk verondersteld, waardoor de correctie alleen op basis van verschillen in minimale relatieve luchtvochtigheid geschiedt. Equivalent aan Allen et al. (1998) schrijven we:

$$K_t(S) = K_t(H) + cor$$

$$\text{met: } cor = a(RH_{\min}(H) - RH_{\min}(S)) \left(\frac{h}{3}\right)^b \quad [7]$$

Met S = klimaatscenario, H = huidig klimaat, cor de correctiefactor, RH_{\min} de (klimaat)gemiddelde minimale relatieve luchtvochtigheid (%), h de vegetatiehoogte (m) en a en b empirische variabelen.

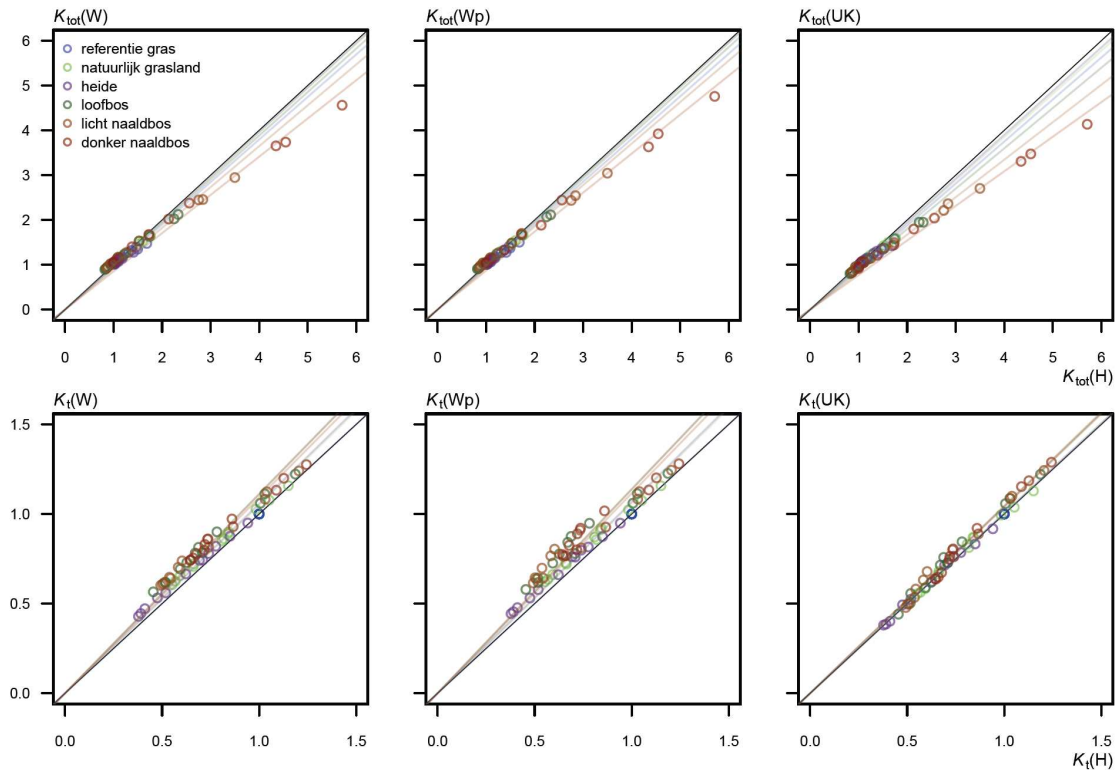
Om te toetsen of de door Allen et al. (1998) voorgestelde correctie de systematische fouten in K_t (Figuur 7) kan verklaren en beperken, is K_t met verg. [7] berekend voor een fictieve vegetatie met $LAI=2$, en met hoogtes variërend van 0 tot 20 m (0, 0.25, 1, 5, 10, 15 en 20 m), voor het huidige klimaat en voor de scenario's W, W+ en UK. Voor $K_t(H)$ zijn de maandwaarden uit Tabel 3 genomen. De windsnelheid is in de analyse dus voor alle klimaten gelijk verondersteld. Dit geeft aan dat aan de absolute uitkomsten van deze analyse niet teveel waarde moet worden gehecht; in werkelijkheid zal de windsnelheid immers verschillen per scenario. De parameters a en b zijn vervolgens via regressie bepaald ($cor \sim K_t(S) - K_t(H)$) (Tabel 5).

Figuur 8 laat in combinatie met Tabel 4 voor twee ruwheden RSC zien dat hoe lager de minimale relatieve luchtvochtigheid is (van hoog naar laag in luchtvochtigheid volgens Tabel 4: UK, H, W, W+), des te groter de correctie is. De droge transpiratie $E_{t,p,l=0}$ van een hoge vegetatie neemt dus toe ten opzichte van die van het referentiegewas. Dit zien we ook terug in de gesimuleerde gewasfactoren voor de klimaatscenario's (Figuur 7), waarvoor K_t systematisch hoger is bij de scenario's W en W+ (beide lage minimale relatieve luchtvochtigheid) dan voor het huidige klimaat H.

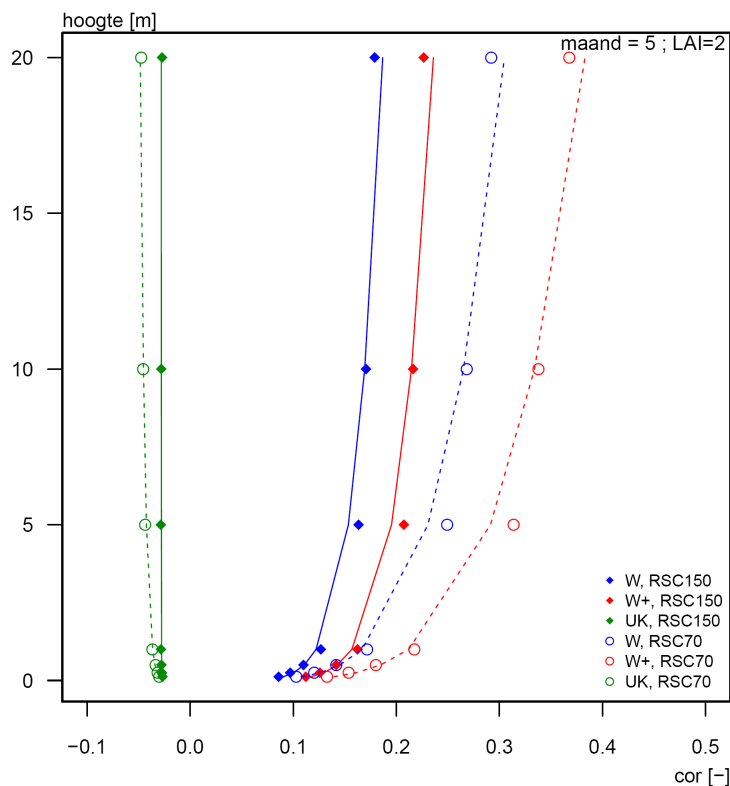
De voorgestelde correctie van vergelijking [7] is per definitie niet geldig voor K_{tot} . Echter, ook voor K_{tot} is geen 1:1 vertaling van de verandering van E_{ref} naar $E_{tot,p}$ mogelijk. Deze gewasfactor blijkt voor alle vegetaties zelfs af te nemen (Figuur 7), wat toe te schrijven is aan een afname van de interceptieterm met een toename van de piekerigheid van het neerslagpatroon.

De maandelijkse correctiefactoren voor K_t waarvan Figuur 8 een voorbeeld geeft, zijn helaas ongeschikt voor toepassing in verschillende klimaatscenario's omdat er geen eenduidige relatie is voor de

verschillende klimatologische omstandigheden. De gefitte parameterwaarden a en b verschillen per scenario (Tabel 5), maar ook zijn de verschillen in K_t – en hiermee in a en b – afhankelijk van de ruwheidskarakteristieken van de vegetatie (Figuur 8) en van de bedekkingsgraad van de bodem (resultaten niet getoond). Dit maakt de correctiefactoren niet algemeen toepasbaar. Een eenvoudige correctie van huidige gewasfactoren voor een ander klimaat lijkt dus, in tegenstelling tot het voorstel van Allen et al. (1998), niet mogelijk te zijn.



Figuur 7: K_{tot} (boven) en K_t (onder) voor de klimaatscenario's (S) W, W+ en UK tegen K voor het huidige Nederlandse klimaat (maandgemiddelden van Tabel 2 en Tabel 3). Voor zowel $K_{tot}(S)$ als $K_t(S)$ zijn er, bij hoge én bij korte vegetaties, systematische verschillen met $K(H)$: $K_{tot}(S)$ heeft systematisch lagere waarden, terwijl $K_t(S)$ juist systematisch hoger uitvalt.



Figuur 8: Gesimuleerde correctie (cor uit vergelijking [7]) voor klimaatscenario's met verschillen in minimale relatieve luchtvochtigheid RH_{min} (Tabel 5) en twee verschillende minimale opperolakteweerstanden (RSC=150 en 70 $s\ m^{-1}$). De punten geven de benodigde correctie ($Kt(S)-Kt(H)$); de lijnen geven de correctiefuncties, waarbij a en b (vergelijking [7]) gefit zijn op de punten. Duidelijk zichtbaar is de niet-lineaire toename van de correctiefactor (horizontale as) met gewashoogte en de afhankelijkheid van de correctiefactor voor opperolakteweerstand RSC.

Tabel 4: Gemiddelde minimale relatieve luchtvochtigheid (RH_{min}) per maand voor de vier onderzochte scenario's.

maand	H	RHmin		
		W	W+	UK
1	74.42	71.80	72.41	73.46
2	69.78	68.02	68.62	70.88
3	65.26	62.61	63.02	65.06
4	58.43	54.26	54.16	62.50
5	57.29	52.83	52.28	59.24
6	59.70	55.39	54.29	59.97
7	60.34	56.17	54.37	61.34
8	60.68	56.48	54.26	60.47
9	65.80	61.99	60.03	64.12
10	69.49	66.85	65.51	68.79
11	74.15	71.76	72.33	71.60
12	75.77	73.42	74.02	74.05

Tabel 5: Gefitte parameters a en b per maand (vergelijking [7]), voor de scenario's W, W+ en UK, voor een gewas met LAI=2 en RSC=150s m⁻¹.

maand	a			b		
	W	W+	UK	W	W+	UK
1	0.14	0.17	0.21	0.14	0.14	0.16
2	0.11	0.16	-0.05	0.13	0.13	0.14
3	0.06	0.08	0.28	0.13	0.12	0.18
4	0.04	0.04	0.01	0.13	0.13	0.03
5	0.03	0.04	0.01	0.14	0.14	0.00
6	0.03	0.04	-0.02	0.15	0.14	0.14
7	0.03	0.04	0.02	0.16	0.15	-0.10
8	0.04	0.04	0.13	0.16	0.16	0.37
9	0.05	0.05	0.07	0.16	0.16	0.17
10	0.09	0.09	0.14	0.15	0.15	0.18
11	0.14	0.19	0.07	0.15	0.15	0.17
12	0.17	0.22	0.11	0.15	0.15	0.17

Analyse periode 1906-2010

Gezien de klimaatafhankelijkheid van gewasfactoren is het interessant om 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?

Figuur 9 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 zonnenschijnduur volgens Allen et al. (1998). De 30-jaar (klimaatgemiddelde) terugschrijdend gemiddelde neerslagintensiteit laat een stijgende trend zien. De referentieverdamping 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 samen met de uitstoot van fijne stofdeeltjes uit vliegtuigen die als condensatiekerntjes fungeren ('global dimming') (Roderick en Farquhar, 2002).

Figuur 10 laat dezelfde terugschrijdende gemiddelden zien, maar nu ten opzichte van de eerst berekende gemiddelde waarde (1906-1935). Behalve neerslag en referentieverdamping, laat deze figuur ook de klimaatgemiddelde totale potentiële verdamping $E_{tot,p}$ en $E_{t,I=0}$, en klimaatgemiddelde waarden van K_{tot} en K_t zien. 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 $E_{t,I=0}$, 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 referentieverdamping 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 klimaatrobuust.

Een voorbeeld van mogelijke effecten van fouten in K op de grondwateraanvulling is gegeven in Figuur 11, waarbij het neerslagoverschot $P - E_{tot,p}$ is berekend met zowel Penman-Monteith als met K_{tot} en K_t . Hierbij hebben onderscheid gemaakt naar de periode waarover K -waarden zijn bepaald. Een meetcampagne van 30 jaar, om klimaatgemiddelde waarden af te leiden, is immers 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 et al., 2008). Om het belang aan te tonen van het gebruik van klimaatgemiddelde K -waarden voor hydrologische toepassingen, zijn K -waarden bepaald op basis van twee verschillende periodes:

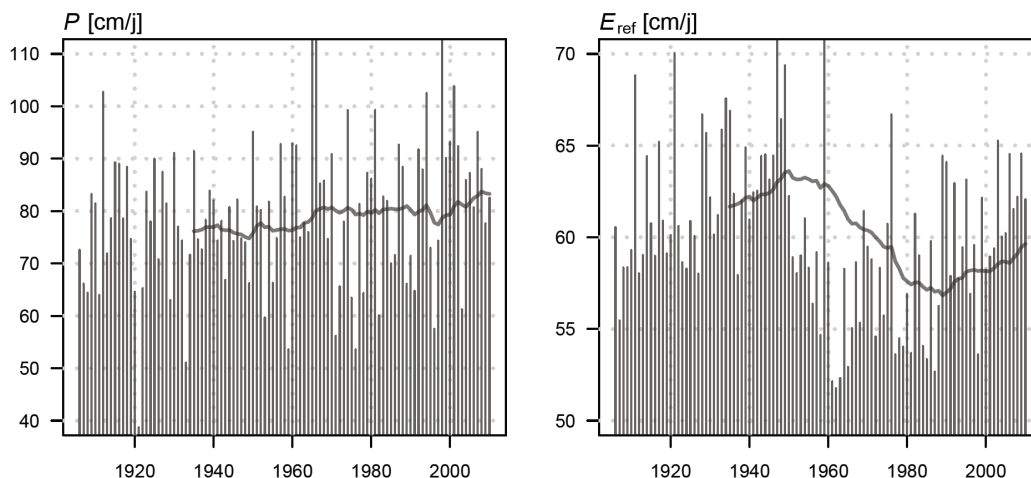
- 1906-1935: representatief voor een klimaatgemiddelde periode van 30 jaar;

- 1906-1908: representatief voor een meetcampagne van 3 jaar.

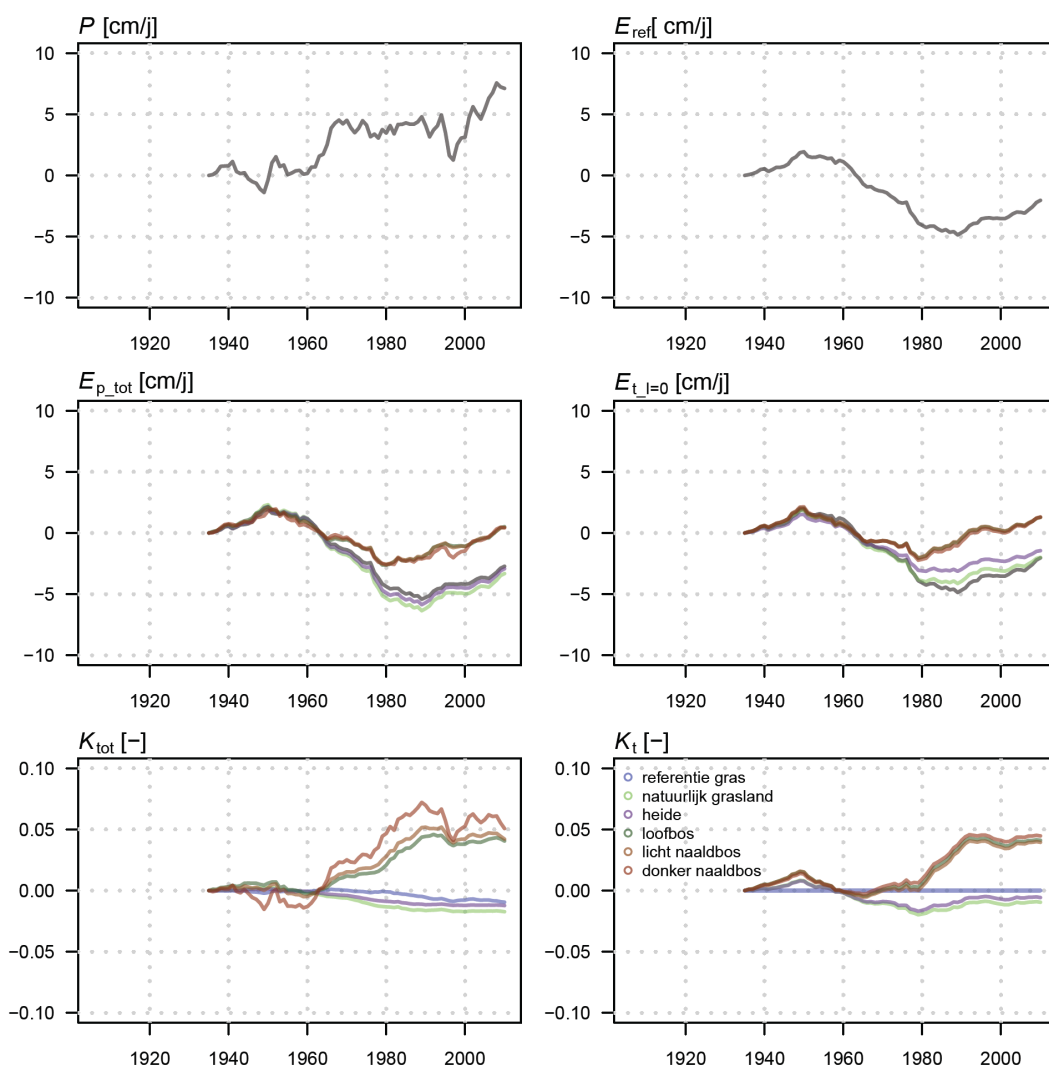
Vervolgens zijn deze K -waarden toegepast voor verdampingsberekeningen over de periode 1906-2010. Deze simulaties geven inzicht aan de toepasbaarheid van K -waarden in klimatologische condities van 50 tot 100 jaar in de toekomst; een analyse equivalent aan klimaatprojecties, met als verschil dat deze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

Gebruik van klimaatgemiddelde K -waarden geeft goede resultaten voor de periode waarop K_t is geparаметriseerd. Bovendien gaat het voor korte vegetaties (klimaat)gemiddeld eigenlijk heel goed, de gemiddelde fout is vrijwel nihil, al zijn 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; Spijksma et al., 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, Figuur 3) is dat een afwijking van maar liefst 17-68%. Daarbij moet gerealiseerd worden 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, al blijft deze beperkt. Kanttekening hierbij dat niet alle 'korte vegetaties' op een representatieve wijze in de NHI schematisering lijken te zijn vertegenwoordigd. In § 3.2 werd al opgemerkt dat de categorieën 'natuurlijke graslanden' en 'heide' wel bijzonder schraal en open moeten zijn om de verschillende gesimuleerde verdampingsposten te kunnen verklaren. Bij rietlanden en ruigten, bijvoorbeeld, zullende interceptie- en de transpiratieterm veel hoger zijn, waardoor de klimaatafhankelijkheid van hun gewasfactoren groter zal zijn.

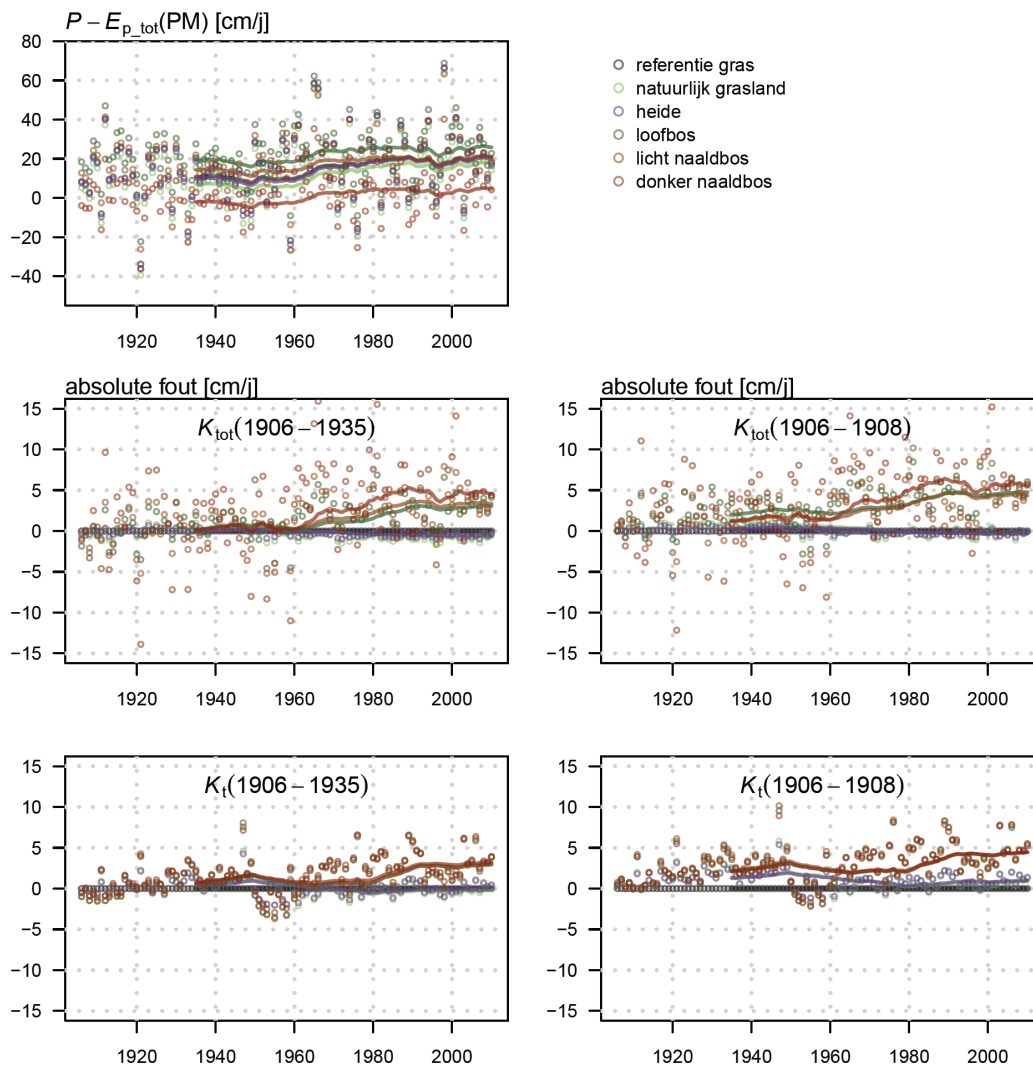
De absolute fout die gemaakt wordt door verandering in K_t voor de door het NHI onderscheiden korte vegetaties op het klimaatgemiddelde neerslagoverschot is dus beperkt. Wel laat deze analyse de gevoeligheid van het gebruik van K_{tot} en K_t op het neerslagoverschot zien en de fout die gemaakt kan worden 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.



Figuur 9: Jaarlijkse neerslagintensiteit en referentieverdamping voor de periode 1906-2010 voor De Bilt. De lijnen geven het 30-jaar (klimaatgemiddelde) terugschrijvende gemiddelde. De dalende trend in E_{ref} in de jaren 1950-1990 is toe te schrijven aan het globaal dimeffect ('global dimming', (Roderick en Farquhar, 2002)), 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.



Figuur 10: Terugschrijdende klimaatgemiddelde waarden van: jaarlijkse neerslagintensiteit en referentieverdamping (boven), E_{p_tot} en E_t zonder interceptie ($E_{t_l=0}$) (midden), en K_{tot} en K_t (jaarwaarden) voor de periode 1906-2010 voor De Bilt. 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 (zie ook Figuur 8) zichtbaar: K_{tot} voor bossen toont een sterk verband met neerslag en dus de interceptie, en binnen korte vegetaties zijn de verschillen gering.



Figuur 11: Jaarwaarden voor het neerslagoverschot ($P - E_{p_tot}(PM)$) voor de periode 1906-2005, De Bilt (boven). De onderste figuren geven de absolute fout ($(P - E_{p_tot}(K_c)) - (P - E_{p_tot}(PM))$) van het gesimuleerde neerslagoverschot bij gebruik van K_{tot} en K_i 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 (klimaatgemiddelde) terugschrijdende gemiddelden. Voor beide K -definities geldt een systematische onderschatting van het neerslagoverschot. De absolute fout is groter voor K_{tot} dan voor K_i 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) klimaatrobust te simuleren.

3.5 Gewaseigenschappen en werkelijke verdamping

Dit onderzoek betreft een conceptuele analyse van de bruikbaarheid van gewasfactoren op de potentiële verdamping; aan de absolute waarden van de 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 dit onderzoek zijn we uitgegaan van vaste gewaseigenschappen, welke niet veranderen onder invloed van de heersende klimatologische condities. Hogere 'water use efficiency' door hogere atmosferische CO₂-concentraties (Kruijt et al., 2008), of afname van bodembedekking (Bartholomeus et al., 2010; Witte et al., 2012) door toegenomen droogtestress, zijn dus nog niet beschouwd. De in deze studie gesimuleerde verandering in K_t wordt dus niet veroorzaakt door de invloed van deze factoren op de transpiratie.

3.6 Klimaatprojecties

We hebben twijfels bij de klimaatprojecties van de Penman-Monteith parameters voor de klimaatprojecties volgens de KNMI'06 scenario's (zie paragraaf 2.1). Voor onze conceptuele analyse is dit van beperkt belang. Is men echter geïnteresseerd in absolute uitkomsten om bijvoorbeeld beleid op te stellen, dan zijn betrouwbare projecties vereist. Wellicht komen deze met de toekomstige generatie klimaatscenario's (KNMInext scenario's, medio 2013).

4 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie hebben we onderzocht of gewasfactoren (K -waarden), afgeleid voor de huidige en historische Nederlandse klimatologische condities, toepasbaar zijn onder andere klimatologische condities. Hiertoe hebben we een tweetal definities onderscheiden:

- K_{tot} : gewasfactoren zoals deze afgeleid worden uit metingen van de totale verdamping (equivalent aan de K -waarden volgens Feddes (1987)). Deze waarden corrigeren impliciet voor bodemverdamping $E_{s,p}$, transpiratie $E_{t,p}$ en interceptieverdamping $E_{i,p}$, en worden dus gebruikt voor het vaststellen van de totale potentiële verdamping ($E_{\text{tot},p}$).
- K_t : gewasfactoren volgens de internationale definitie van de FAO (Allen et al., 1998), welke alleen corrigeert voor E_t . Deze definitie vereist dat E_s en E_i expliciet worden gesimuleerd (wat onnauwkeurigheden kan introduceren).

Beide definities van gewasfactoren blijken ongeschikt voor toepassing in klimaatprojecties. Ook in de afgelopen 100 jaar blijken de klimaatgemiddelde K -waarden aanzienlijke variaties te hebben vertoond. Het gebruik van K -waarden voor Nederland, zoals bepaald in de jaren 1980 (Feddes, 1987), 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 wordt aanbevolen de gepubliceerde K -waarden aan te passen aan de klimatologische condities waarvoor men berekeningen uitvoert. Dat kan door nauwkeurige metingen van de werkelijke verdamping te combineren met modelsimulaties. Metingen worden gebruikt om een hydrologisch model, zoals SWAP, te parametriseren en te valideren. Vervolgens kan via het model de meetperiode opgeschaald worden naar klimaatgemiddelde waarden. Om de betrouwbaarheid van hydrologische simulaties te vergroten, wordt echter aanbevolen aan te sluiten bij de internationale definitie van K -waarden, ofwel om K_t te gebruiken. Voor de huidige klimatologische omstandigheden resulteert dit namelijk niet alleen in goede schattingen van de gemiddelde hydrologische condities, maar ook van de extremen. Belangrijk nadeel van deze methode is dat E_s en E_i expliciet berekend moeten worden, wat onnauwkeurigheden zal introduceren.

Voor toepassing voor stationaire, langjarig gemiddelde situaties, zal K_{tot} vermoedelijk redelijke resultaten opleveren, mits de bestaande K_{tot} -waarden (Feddes, 1987) worden aangepast aan het huidige klimaat. Echter, om het toepassingsbereik van K -waarden vast te stellen zal voor verschillende hydrologische analyses de bruikbaarheid van K -waarden nader moeten worden onderzocht.

In principe kunnen gewasfactoren voor klimaatscenario's worden afgeleid. Ook gebruiken Allen et al. (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, adviseren we deze stap niet te zetten. Beter kan geïnvesteerd worden in goede parametrisering van de Penman-Monteith vergelijking voor vegetatie-eigenschappen en meteorologische condities. Hiermee kan direct de potentiële verdamping van een begroeid oppervlak worden bepaald, bijvoorbeeld met SWAP, zoals we in dit rapport hebben laten zien. 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 werkelijke verdamping worden bepaald. Voor het parametriseren van vegetatie-eigenschappen voor Nederlandse condities zijn metingen vereist, waarbij variatie in ruimte én tijd wordt beschouwd. Met zulke metingen zijn we in BTO-project B111800 voorzichtig begonnen.

Nauwkeurige 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 et al., 2012). Dit heeft gevolgen voor de grondwateraanvulling, de dynamiek van de grondwaterstand, maar ook van de nutriëntenhuishouding van de bodem. Expliciete beschouwing van de vegetatie is daarom nodig in hydrologische modellen, om

een betrouwbare schatting te maken van de hoeveelheid neerslag die bijdraagt aan bijvoorbeeld de grondwateraanvulling. Aanbevolen wordt om een stap te zetten om de vegetatie en hiermee potentiële verdamping voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat goed te schematiseren in hydrologische modellen. Internationaal wordt het belang van vegetatie in hydrologische modellen en het expliciet onderscheiden van bodemverdamping, transpiratie en interceptieverdamping meer en meer erkend (Brooks et al., 2011; Jackson et al., 2009). De wisselwerking tussen bodemvocht, vegetatie en atmosfeer krijgt steeds meer aandacht, en vormt een groot aandeel van het onderzoek binnen de hedendaagse (eco)hydrologie. Ook door de drinkwaterbedrijven is deze weg ingezet, door te investeren in onderzoek naar de actuele grondwateraanvulling, en het inzetten van een opstelling met lysimeters. De metingen uit deze lysimeters zijn een belangrijke aanzet om berekende actuele verdamping te valideren aan meetgegevens voor natuurlijke vegetaties. Deze kunnen worden opgeschaald naar de resolutie die aansluit bij verdampingsbepalingen uit satellietbeelden (zoals SEBAL), een gebruikt ter validatie van de berekende verdamping met hydrologische modellen volgens Penman-Monteith. Dat een meer procesmatige aanpak dan die met gewasfactoren nodig is, is uit dit rapport hopelijk helder geworden.

Concreet wordt aanbevolen:

- terughoudend te zijn met het toepassen van gewasfactoren voor het bepalen van de potentiële verdamping in hydrologische modellen;
- het effect van gebruik van gewasfactoren op de werkelijke grondwateraanvulling en op de grondwaterdynamiek te kwantificeren;
- aan te sluiten bij internationale ontwikkelingen in de schematisering van verdampingsvergelijkingen in hydrologische modellen, waarin de wisselwerking tussen bodemvocht, vegetatie en atmosfeer expliciet wordt beschouwd;
- te investeren in nauwkeurige verdampingsmetingen van natuurlijke vegetaties;
- te onderzoeken hoe metingen opgeschaald kunnen worden, zowel in ruimte in tijd. Hierbij moet onder andere de toepassing van Remote Sensing technieken in ogenschouw genomen worden;
- te onderzoeken hoe gewaseigenschappen, zoals de bedekkingsgraad en 'water use efficiency', veranderen door veranderingen in omgevingsfactoren, en hoe deze doorwerken op de werkelijke verdamping, grondwateraanvulling en grondwaterdynamiek.

5 Referenties

- Allen, R.G., 2005. Penman-Monteith Equation. In: D. Hillel, J.L.H., D.S. Powlson, C. Rosenzweig, K.M. Scow, M.J. Singer, D.L. Sparks (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, pp. 2119.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 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., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2005. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1(2): 2-13.
- Bakker, A., Bessembinder, J., 2011. Integraal Waterbeheer - kritische zone & onzekerheden; NMDC-Innovatieproject, deelresultaat referentie meteo.
- Bartholomeus, R.P., Heijkers, J., Droogers, P., Van Dam, J.C., Van Walsum, P., 2012. Actuele verdamping in hydrologische modellen. In: *NHV_werkgroep_Verdamping* (Ed.), *Schatting van de actuele verdamping. Verdamping in de hydrologie, een actuele stand van zaken*. NHV-special.
- Bartholomeus, R.P., Voortman, B., Witte, J.P.M., 2010. De toekomstige grondwateraanvulling. *H2O*, 17: 35-37.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., Van Bodegom, P.M., Aerts, R., 2008. The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation. *J Veg Sci*, 19: 799-808.
- Brooks, P.D., Troch, P.A., Durcik, M., Gallo, E., Schlegel, M., 2011. Quantifying regional scale ecosystem response to changes in precipitation: Not all rain is created equal. *Water Resour. Res.*, 47(7): W00J08.
- Dolman, H., Moors, E., Elbers, J., Snijders, W., Hamaker, P., 2000. *Het waterverbruik van bossen in Nederland*. Alterra, Wageningen.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. *Crop water requirements; Irrigation and drainage paper No. 24*, FAO, Rome.
- Droogers, P., 2009. Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer; Definitiestudie. *STOWA 2009-11*, STOWA, Utrecht.
- Farahani, H.J., Howell, T.A., Shuttleworth, W.J., Bausch, W.C., 2007. Evapotranspiration: Progress in Measurement and Modeling in Agriculture. *Transactions of the ASABE*, 50(5): 1627-1638.
- Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. In: Hooghart, C. (Ed.), *Evaporation and weather. Proceedings and Information. Comm. Hydrological Research TNO, The Hague*, pp. 33-47.
- Feddes, R.A., Raats, P.A.C., 2004. Parameterizing the soil-water-plant root system. In: Feddes, R.A., Rooij, G.H.d., Van Dam, J.C. (Eds.), *Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges, Applications Wageningen UR Frontis Series Wageningen*, pp. 95-141.
- Federer, C.A., Vörösmarty, C., Fekete, B., 1996. Intercomparison of Methods for Calculating Potential Evaporation in Regional and Global Water Balance Models. *Water Resour. Res.*, 32(7): 2315-2321.
- Gavin, H., Agnew, C.T., 2000. Estimating evaporation and surface resistance from a wet grassland. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(7-8): 599-603.
- Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Hoffman, L., Pfister, L., 2007. New technique to measure forest floor interception? An application in a beech forest in Luxembourg. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2): 695-701.
- Gerrits, M., 2009. Na regen komt interceptie... *Stromingen*, 15(1): 37-40.
- Gerrits, M., 2010. *The role of interception in the hydrological cycle*, Delft University of Technology, Delft, 126 pp.
- Hermans, F., Ott, J., Van Bakel, J., 2009. Regionale hydrologische modellering ter onderbouwing van klimaateffecten. *H₂O*, 4: 28-32.
- Itenfis, D., Elliott, R.L., Allen, R.G., Walter, I.A., 2003. Comparison of Reference Evapotranspiration Calculations as Part of the ASCE Standardization Effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6): 440-448.

- Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., 2009. Ecohydrology in a human-dominated landscape. *Ecohydrology*, 2(3): 383-389.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., 2009. SWAP version 3.2, Theory description and user manual. Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- Kruijt, B., Witte, J.-P.M., Jacobs, C.M.J., Kroon, T., 2008. Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *J Hydrol*, 349(3-4): 257-267.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D., 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Journal of American Water Resources Association*, 41(3): 621-633.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11: 277-288.
- Massop, H.T.L. et al., 2005. Op zoek naar de ware neerslag en verdamping, Alterra, Wageningen.
- 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., Farquhar, G.D., 2002. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years. *Science*, 298(5597): 1410-1411.
- Spieksma, J.F.M., Dolman, A.J., Schouwenaars, J.M., 1996. De parameterisatie van de verdamping van natuurterreinen in hydrologische modellen.
- Tiktak, A., Bouten, W., 1994. Soil water dynamics and long-term water balances of a Douglas fir stand in the Netherlands. *J Hydrol*, 156(1-4): 265-283.
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 640-653.
- van Walsum, P.E.V., Supit, I., 2012. Influence of ecohydrologic feedbacks from simulated crop growth on integrated regional hydrologic simulations under climate scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6): 1577-1593.
- Van Walsum, P.E.V., Veldhuizen, A.A., 2011. MetaSWAP_V7_2_0. Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. Rapporten PBL/WOt.
- Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Cirkel, D.G., Kamps, P.W.T.J., 2008. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland, Kiwa rapport KWR 08.006, Nieuwegein.
- Witte, J.P.M. et al., 2012. An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for The Netherlands: bridging the gap between science and society. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9(5): 6311-6344.
- Zhou, M.C. et al., 2006. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin. *J Hydrol*, 327(1-2): 151-173.

I Bijlage: aanpassingen SWAP-code

SWAP version 3.2.26

Extra swcf added in *.crp file; If swcf=3, then cfdry is used and interception should be simulated for the actual crop (and not for the reference crop). Therefore, both cf and ch are model input:

* Part 4: crop factor or crop height

SWCF = 3 ! choice between traditional crop factor [=1] or crop height [=2] or crop factor for a dry crop [=3]

* Choose crop factor if ETref is used, either from meteo input file (SWETR = 1) or with Penman-Monteith

* Choose crop height if Penman-Monteith should be used with actual crop height, albedo and resistance

* Choose

* If SWCF = 1, list crop factor CF [0.5..1.5, R], as function of dev. stage DVS [0..2 -,R]:

* If SWCF = 2, list crop height CH [0..1000 cm, R], as function of dev. stage DVS [0..2 -,R]:

* If SWCF = 3, list crop factor CF for a dry crop AND crop height CH, as function of dev. stage DVS [0..2 -,R]:

* if SWCF = 3 then crop factor is applied on T only; interception is explicitly simulated* (maximum 36 records)

* provide CH, ALBEDO AND RSW of actual crop

* if SWCF = 1 then the 'traditional' crop factor is used, i.e. based on measurements, thus implicitly including E+T+I

Code changed in variables.for:

```
real*8  albedo_ew0      ! Crop reflection coefficient for calculation of ew0 in case of swcf=3 (-)
real*8  rsw_ew0        ! Canopy resistance of intercepted water for calculation of ew0 in case of swcf=3 (T/L)
real*8  ch_ew0        ! Crop height for calculation of ew0 in case of swcf=3 (cm)
real*8  ew0_ActCr      ! potential transpiration rate from a wet crop in case of swcf=3 [mm/d]
```

Code changed in readswap.for:

```
! --- Crop factor or crop height
call rdsinr ('swcf',1,3,swcf) !RB 2->3
! --- check use of crop factors in case of ETref
if (swetr.eq.1 .and. swcf.eq.2) then
  message = 'If ETref is used (SWETR = 1), always define crop '//'
  &      'factors (SWCF = 1)'
  call fatalerr ('ReadWofost',message)
endif
####
if (swcf.eq.1) then
! --- crop factor is input
call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
call rdofor ('cf',0.0d0,10.0d0,cfinput,36,ifnd) !RB higher max values of cf possible
! --- store values in cftb
do i = 1,ifnd
  cftb(i*2) = cfinput(i)
  cftb(i*2-1) = dvsinput(i)
enddo
chtb = -99.99d0
else if (swcf.eq.2) then !RB
! --- crop height is input
call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
call rdofor ('ch',0.0d0,1.0d4,chinput,36,ifnd)
! --- store values in chtb
do i = 1,ifnd
  chtb(i*2) = chinput(i)
  chtb(i*2-1) = dvsinput(i)
enddo
cftb = -99.99d0
else !RB
! --- crop height and cf_dry are input
call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
call rdofor ('ch',0.0d0,1.0d4,chinput,36,ifnd)
call rdofor ('cf',0.0d0,10.0d0,cfinput,36,ifnd)
! --- store values in chtb
do i = 1,ifnd
  chtb(i*2) = chinput(i)
  chtb(i*2-1) = dvsinput(i)
  cftb(i*2) = cfinput(i)
  cftb(i*2-1) = dvsinput(i)
enddo
endif
```

Code changed in meteoinput.for:

```
! --- crop is present -----
  if (swcfbs .eq. 1) es0 = cfbs*et0
  if (swcf.eq.1) then
    et0 = cf*et0
    ew0 = cf*ew0
  endif
  !RB alternative for ew0 and es0;
  if (swcf.eq.3) then
    et0 = cf*et0
    ch_ew0 = afgen (chtb,72,dvs)
    call Penman_RB (logf,swscre,daymeteo,lat,alt,altw,a,b,rsc,
&      rad,tav,hum,win,es0,ew0_ActCr,ch_ew0,flbaresoil,
&      daylp,
&      flmetdetail,irecord,nmetdetail,albedo_ew0,tmn,tmx,
&      rsw_ew0)
    ew0 = ew0_ActCr
  endif
```

Code changed in cropgrowth.for:

```
  if (swcf.eq.1) then
! --- crop factor is input
  call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
  call rdfdor ('cf',0.0d0,10.0d0,cfinput,36,ifnd) !RB higher max values cf possible
! --- store values in cftb
  do i = 1,ifnd
    cftb(i*2) = cfinput(i)
    cftb(i*2-1) = dvsinput(i)
  enddo
  chtb = -99.99d0
  else if (swcf.eq.2) then !RB
! --- crop height is input
  call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
  call rdfdor ('ch',0.0d0,1.0d4,chinput,36,ifnd)
! --- store values in chtb
  do i = 1,ifnd
    chtb(i*2) = chininput(i)
    chtb(i*2-1) = dvsinput(i)
  enddo
  cftb = -99.99d0
  else !RB
! --- crop height and cf_dry are input
  call rdador ('dvs',0.0d0,2.0d0,dvsinput,36,ifnd)
  call rdfdor ('ch',0.0d0,1.0d4,chinput,36,ifnd)
  call rdfdor ('cf',0.0d0,10.0d0,cfinput,36,ifnd)
! --- store values in chtb and cftb
  do i = 1,ifnd
    chtb(i*2) = chininput(i)
    chtb(i*2-1) = dvsinput(i)
    cftb(i*2) = cfinput(i)
    cftb(i*2-1) = dvsinput(i)
  enddo
  endif

! --- reflection coefficient and crop resistance
  if (swcf.eq.1) then
! --- use standard values for ETref
    albedo = 0.23d0
    rsc = 70.0d0
    rsw = 0.0d0
  else if (swcf.eq.2) then !RB
! --- use crop specific values
    call rdsdor ('albedo',0.0d0,1.0d0,albedo)
    call rdsdor ('rsc',0.0d0,1.0d6,rsc)
    call rdsdor ('rsw',0.0d0,1.0d6,rsw)
  else !RB
! --- use standard values for ETref
    albedo = 0.23d0
    rsc = 70.0d0
```



```

rsw = 0.0d0
! --- use crop specific values for calculation of ew0
call rdsdor ('albedo',0.0d0,1.0d0,albedo_ew0)
call rdsdor ('rsw',0.0d0,1.0d6,rsw_ew0)
endif

```

Penman_RB.for added for calculation of ew0 for swcf = 3 (adjusted version of of penmon.for)

```

! File VersionID:
! $Id: penman_RB.for 167 2011-10-12 Ruud Bartholomeus $
!only for ew0, if kc_dry is used
!-----
subroutine Penman_RB (logf,swscre,daymeteo,lat,alt,altw,a,b,
& rad,tav,hum,win,ew0_ActCr,ch_ew0,flbaresoil,daylp,
& flmetdetail,irecord,nmetdetail,albedo_ew0,tmn,tmx,rsw_ew0)
!-----
! date      : 14/01/99
! purpose   : calculation of potential evaporation &
!             transpiration rates from a bare soil surface,
!             a dry and a wet crop canopy;
!             based on the penman - monteith approach.
! global
! formal parameters : (i = input, o = output)
! logf  Internal number of logbook output file *.LOG .....i
! swscre Switch of screen display: 0 = no display; .....i
!       1 = summary water balance; 2 = daynumber
! daymeteo  daynumber (january 1st = 1) [-].....i
! lat  latitude [degr.,dec.degr., n=+,s=-].....i
! alt  altitude above mean sea level [m].....i
! altw  altitude of wind speed measurement [m] .....i
! a  first angstrom coefficient [-].....i
! b  second angstrom coefficient [-].....i
! albedo reflection coefficient crop [-].....i
! rad  incoming short wave radiation [j/m2/d].....i
! tav  average temperature (24 hour) [C].....i
! hum  vapour pressure [kpa].....i
! win  windspeed at 2 m height [m/s].....i
! rsw_ew0  canopy resistance of intercepted water [s/m].....i
! swcf  switch use crop factor (=1) or crop height (=2).....i
! ch_ew0  crop height [cm].....i
! ew0_ActCr  potential transpiration rate from a wet crop [mm/d].....o
!
! local
! ckarman von karman constant [-]
! zm  height of wind speed [cm]
! zh  height of temperature and humidity measurement [cm]
! d  zero displacement of wind profile [cm]
! zom  roughness parameter for momentum [cm]
! zoh  roughness parameter for heat and vapour [cm]
! zmeasw  altitude of wind speed measurement [m] .....i
!-----
implicit none
! global
integer daymeteo,swcf,logf,swscre,irecord,nmetdetail
real*8 lat,alt,altw,tmn,tmx
real*8 a,b,hum,rad,tav,win
logical flbaresoil,flmetdetail

real*8 ch_ew0,rsw_ew0,ew0_ActCr,albedo_ew0

! local
real*8 lambda,atmtr,cosld,dayl,delta,dsinb,dsinbe,dso,ea
real*8 ed,etaerc,etaers,etaerw,etradc,etrads,etradw
real*8 gamma,gammoc,gammos,gammow,palt,rac,ras,raw,cp
real*8 relssd,rho,rnc,rnl,rns,rnw,rss,sinld,tavk,tkv
real*8 ud,vpd,daylp,gs,gc,gw,radial,dec,aob
real*8 ckarman,chgrass,chsoil,d,dgrass
real*8 zm,zmeasw,zmeash,zom,zomgrass,zh,zoh
real*8 zact,dact,zomact,fact,fmeas
real*8 sunrise,sunset,startrec,endrec,t1,t2,pi,sc
character messag*200

```

```

! local parameters
data chgrass /12.0d0/ ! height of reference crop grassland [cm]
data zmeash /200.0d0/ ! default height of humidity and temperature measurement [cm !]
data ckarman /0.41d0/ ! von karman constant [-]
data chsoil /0.1d0/ ! nihil crop height for a wet bare soil [cm]
data pi /3.141593d0/ ! number pi
!-----
! --- conversion to cm
zmeasw = 100.0d0 * altw
! --- avoid zero crop height
if (flbaresoil) then
  ch_ew0 = chgrass
else
  ch_ew0 = max (ch_ew0,0.1d0)
endif
! --- conversion of average temperature from [c] to [k]
tavk = tav+273.15d0
! --- atmospheric pressure at elevation alt [kpa]
palt = 101.3d0*((tavk-0.0065d0*alt)/tavk)**5.26
! --- latent heat of vaporization [mj/kg]
lambda = 2.501d0-0.002361d0*tav
! --- saturation vapour pressure [kpa]
if (flmetdetail) then
  ea = 0.611d0*exp(17.27d0*tav/(tav+237.3d0))
else
  ea = 0.3055d0*(exp(17.27d0*tmn/(tmn+237.3d0)) +
& exp(17.27d0*tmx/(tmx+237.3d0)))
endif
! --- measured vapour pressure not to exceed saturated vapour pressure
ed = min(hum,ea)
! --- vapour pressure deficit [kpa]
vpd = ea-ed
! --- slope vapour pressure curve [kpa/c]
delta = 4098.0d0*ea/(tav+237.3d0)**2
! --- psychrometric constant [kpa/c]
gamma = 0.00163d0*palt/lambda
! --- atmospheric density [kg/m3]
tkv = tavk/(1.0d0-0.378d0*ed/palt)
rho = 3.486d0*palt/tkv
! --- specific heat moist air [kj/kg/c]
cp = 622.0d0*gamma*lambda/palt
! --- aerodynamic resistance [s/m] - soil, crop & wet crop
! - day wind [m/s] for daily records, avoid zero windspeed
ud = max (win, 0.0001d0)
! adjust wind speed if crop height deviates from measurement height of wind speed
! assuming equal wind speed at 100 meter (1.0d4 cm !) above the soil surface
! (all length-units in cm ! )
if (ch_ew0.gt.zmeash .or. zmeasw.gt.zmeash) then
  dgrass = 2.0d0/3.0d0 * chgrass
  zomgrass = 0.123d0 * chgrass
  fmeas = log((1.0d4-dgrass)/zomgrass) /
& log((zmeasw-dgrass)/zomgrass)
  zact = max(ch_ew0,200.0d0)
  dact = 2.0d0/3.0d0 * ch_ew0
  zomact = 0.123d0 * ch_ew0
  fact = log((zact-dact)/zomact) / log((1.0d4-dact)/zomact)
  ud = ud * fact * fmeas
endif
! - constants to determine aerodynamic resistance
zm = max(ch_ew0,zmeash) ! measured height of wind speed measurement [cm !]
zh = zm ! height of humidity and temperature measurement [cm !]
d = 2.0d0/3.0d0 * ch_ew0 ! zero displacement of wind profile [cm !]
zom = 0.123d0 * ch_ew0 ! roughness parameter for momentum [cm]
zoh = 0.1d0 * zom ! roughness parameter for heat and vapour [cm]
! - aerodynamic resistance for dry and wet crop
rac = log ((zm - d)/zom) * log((zh - d)/zoh) / ckarman**2/ud
raw = rac
! - aerodynamic resistance for bare wet soil with a crop height set to 0.1 cm
d = 2.0d0/3.0d0 * chsoil ! zero displacement of wind profile at low height [cm !]
zom = 0.123d0 * chsoil ! roughness parameter for momentum at low height [cm]

```

```

    zoh = 0.1d0 * zom      ! roughness parameter for heat and vapour [cm]
    ras = log((zm - d)/zom) * log((zh - d)/zoh) / ckarman**2/ud
! --- surface resistance of wet soil [s/m]
    rss = 0.0d0
! --- modified psychrometric constant [kpa/c] - soil, crop & wet crop
    gammow = gamma*(1.0d0+rsw_ew0/raw)
! --- net short wave radiation [mj/m**2/d] - soil, crop & wet crop
    rnw = (1.0d0-albedo_ew0)*rad/1000000.0d0
! --- procedure to derive extraterrestrial radiation [mj/m2/day]
    if (flmetdetail) then
! --- declination of the sun as a function of daynr
        radial = pi/180.d0
        dec = -asin(sin(23.45d0*radial)*
&          cos(2.0d0*pi*dbler(daymeteo+10)/365.0d0))
! --- some intermediate variables
        sinld = sin(radial*lat)*sin(dec)
        cosld = cos(radial*lat)*cos(dec)
        aob = sinld/cosld
! --- calculation of astronomical daylength
        if (aob.lt.-1.0d0) then
            messag='Warning: latitude above polar circle, daylength= 0hrs'
            call warn ('Astro',messag,logf,swscre)
        else if (aob.gt.1.0d0) then
            messag='Warning: latitude within polar circle,daylength=24hrs'
            call warn ('Astro',messag,logf,swscre)
        else
            dayl = 12.0d0*(1.0d0+2.0d0*asin(aob)/pi)
        endif
! Solar constant [j/m2/day]
        sc = 118.08d6*(1.0d0+0.033d0*cos(2.0d0*pi*daymeteo/365.d0))
! --- Extraterrestrial radiation of current period (dso) [j/m2/day]
        sunrise = 0.5d0 - dayl / 48.d0
        sunset = 0.5d0 + dayl / 48.d0
        startrec = dble(real(irecord-1)/real(nmetdetail))
        endrec = dble(real(irecord)/real(nmetdetail))
        if (endrec .lt. sunrise) then
            dso = 0.d0
        else if (startrec .gt. sunset) then
            dso = 0.d0
        else if (startrec .lt. sunrise) then
! --- solar time angle at beginning of radiation period
            t1 = (sunrise - 0.5d0) * 2.d0 * pi
! --- solar time angle at end of radiation period
            t2 = (endrec - 0.5d0) * 2.d0 * pi
            dso = sc/2.d0/pi*((t2 - t1)*sinld + cosld*(sin(t2) - sin(t1)))
&          * nmetdetail
        else if (endrec .gt. sunset) then
! --- solar time angle at beginning of radiation period
            t1 = (startrec - 0.5d0) * 2.d0 * pi
! --- solar time angle at end of radiation period
            t2 = (sunset - 0.5d0) * 2.d0 * pi
            dso = sc/2.d0/pi*((t2 - t1)*sinld + cosld*(sin(t2) - sin(t1)))
&          * nmetdetail
        else
! --- solar time angle at beginning of radiation period
            t1 = (startrec - 0.5d0) * 2.d0 * pi
! --- solar time angle at end of radiation period
            t2 = (endrec - 0.5d0) * 2.d0 * pi
            dso = sc/2.d0/pi*((t2 - t1)*sinld + cosld*(sin(t2) - sin(t1)))
&          * nmetdetail
        endif
        else
! --- just daily extraterrestrial radiation (one record per day)
            call astro(logf,swscre,daymeteo,lat,
&          dayl,daylp,sinld,cosld,dsinb,dsinbe,dso)
        endif
! --- net long wave radiation (mj/m2/d)
        atmtr = 0.0d0
        if (dso.gt.1.0d-5) atmtr = rad/dso
        relssd = max(min((atmtr-a)/b,1.0d0),0.0d0)

```

```

    rnl =
    & 4.9d-9*tavk**4*(0.34d0-0.14d0*sqrt(ed))*(0.1d0+0.9d0*relssd)
! --- soil heat flux [mj/m2/d]
    if (flmetdetail) then
        if ((startrec+endrec)/2.d0 .gt. sunrise .and.
            & (startrec+endrec)/2.d0 .lt. sunset) then
! --- daytime period
            gw = 0.1d0 * (rnw - rnl)
        else
! --- nighttime period
            gw = 0.5d0 * (rnw - rnl)
        endif
    else
! --- daily record, net flux negligible
        gw = 0.d0
    endif
! --- aerodynamic term of the pm equation [mm/d] - wet crop
    etaerw = (86.4d0/lambda)*(1.0d0/(delta+gammow))*(rho*cp*vpd/raw)
! --- radiation term of the pm equation [mm/d] - wet crop
    etradw = delta/(delta+gammow)*(rnw-rnl-gw)*1.0d0/lambda
! --- sum of both terms [mm/d] - wet crop
    ew0_ActCr = max (0.0d0,etaerw+etradw)
    return
end
#####

```

