
Lysimeteronderzoek naar de evapotranspiratie van riet en els in een trilveen bij Schalkwijk (U)

Wladimir Bleuten en Marc Bierkens¹

Inleiding

De verdamping (evapotranspiratie: E) van moerassen is in diverse onderzoeken bepaald met nogal verschillende resultaten (Mohamed e.a., 2012, Pauliukonis en Schneider, 2001, Spieksma e.a., 1997). In de meeste onderzoeken is de evapotranspiratie indirect bepaald uit berekende openwaterverdamping (Penman, 1948) of uit referentieverdamping (bijvoorbeeld Makkink, 1957) met gebruik van gewasfactoren afgeleid uit onderzoeken naar de waterbalans van landbouwgewassen en lysimeteronderzoek (Spieksma e.a., 1996, Massop e.a., 2005, Bartolomeus e.a., 2013). De E van natuurlijke ecosystemen is veel minder onderzocht (Spieksma e.a., 1997).

Onder moerasvegetaties van Nederlandse laagvenen zijn rietland en broekbos (els, wilg) de meest voorkomende typen. Voor waterbalansberekening en modellering van (grond)waterstanden van gebieden waarin zich moerassen bevinden is informatie over de E van deze typen dus erg belangrijk. Zoals gezegd zijn gegevens hierover vrijwel niet voorhanden. Mohamed e.a. (2012) geven een internationaal overzicht van gevonden E van moerassystemen, waaronder van rietland. Voor broekbossen hebben we geen gegevens van de E gevonden.

Het doel van deze studie was om de E door riet en van bomen in een rietmoeras (rietkragge) te bepalen en deze te vergelijken met die van open water. Hiertoe zijn tussen 2006 en 2010 lysimetermetingen gedaan bij Schalkwijk. Dit artikel beschrijft de opzet van de metingen en de meetresultaten.

Locatie onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd bij Schalkwijk (Afbeelding 1; N 51,972, E 5,202) in een moeras-natuur gebied van 1,6 ha bestaande uit een meer (1,6 m diep) en een rietkragge (wortelmat van *Phragmites australis* van ongeveer 0,5 m dik). Aan de randen van het rietveld zijn bosjes van els (*Alnus glutinosa*) en woekerende wilg (*Salix* sp.) aanwezig. Het rietveld wordt in de winter gemaaid. Het moeras en het meer wateren vrij af op het polderwater. Aanvoer van water is alleen neerslag.

¹ Universiteit Utrecht, Departement Fysische geografie (w.bleuten@uu.nl)

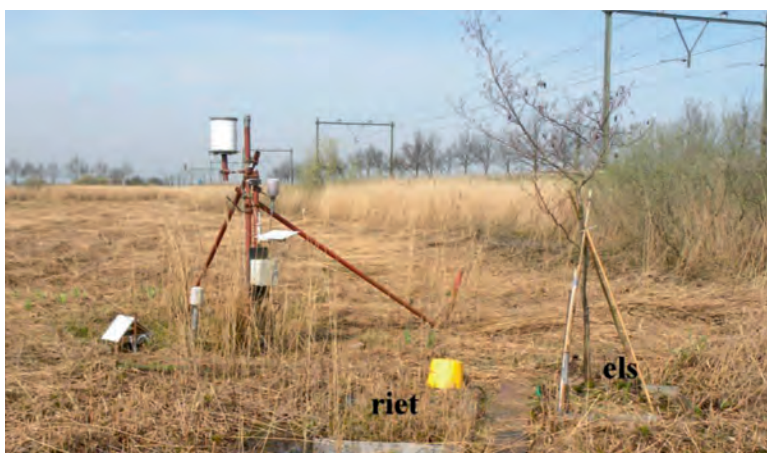


Afbeelding 1: Ligging lysimeters. 1: lysimeter "water", 2: lysimeters "riet"

Methoden

Lysimeters

Voor het lysimeteronderzoek zijn 3 roestvrijstalen bakken (LxBxH: 1x1x1,2 m, wanddikte 2 mm) gebruikt. De bakken waren alleen aan de bovenzijde open, net als die van Read e.a. (2008) en die van Xu en Ma (2011), zodat het waterpeil alleen bepaald wordt door neerslag, verdamping en transpiratie. De bakken waren zodanig afgezonken dat alleen de bovenrand (circa 0,15 m) boven het wateroppervlak en omgevende kragge uitstak. In het meer is een bak (lysimeter "water") gevuld met water van het meer tot gelijke hoogte als buiten de lysimeter. Twee andere bakken (Afbeelding 2) zijn ingegraven in de rietkragge en gevuld met ongeveer 0,5 m water en 0,35 m plaat-



Afbeelding 2: Meteostation en lysimeters "els" en "riet" in winter.

selijk uitgegraven wortelmat (Afbeelding 3 lysimeter: "riet") respectievelijk met een boom (*Alnus glutinosa*) van 2,5 m hoog (Afbeelding 4 lysimeter: "els"). In de lysimeters werd door aanvullen of afhevelen de variaties in het waterpeil beperkt tussen minimaal 0,05 m en maximaal 0,2 m beneden de rand. Het waterpeil en watertemperatuur in en boven de lysimeters werd gemeten met luchtdruk gecompenseerde druksensoren (Diver, resolutie 2 mm) en thermosensors (Keller).

Metingen

De luchttemperatuur (T), inkomende straling (rad) en neerslag (P : tipping bucket 0,1 mm Cassella met datalogger: HOBO) werd gemeten op 2 meter boven de wortelmat, net boven de maximale riethoogte.

Waterpeilen en meteorologische data zijn per uur vastgelegd (Campbell PC208W). Alle geregistreerde waterstanden zijn gecorrigeerd voor aanvulling respectievelijk afhevelen. Hieruit zijn waarden per dag berekend als 24 uur gemiddelden van temperatuur en waterstand. Straling is gesommeerd over 24 uur.



Afbeelding 3: Lysimeter "riet". Links: van boven in juli 2010; Rode 'ijn: rand van lysimeter; rechts: winter.



Afbeelding 4: Lysimeter "els" van boven in Juli 2010. Rode lijn: rand van lysimeter. Rechts: winter.

Voor bepaling van de Leaf Area Index (*LAI*) is op 5 tot 8 dagen verspreid over het groeiseizoen van de jaren 2006, 2007, 2008 en 2010 het aantal bladeren en het gemiddelde bladoppervlak van de els geteld en de riethoogte gemeten. Het product van aantal bladeren en gemiddeld bladoppervlak is gelijk is aan de LAI_{els} omdat het oppervlak van de lysimeter 1 m² bedraagt. De kruiden in ondergroei van de lysimeter "els" zijn zo goed mogelijk verwijderd teneinde alleen de transpiratie door de els te kunnen herleiden. De aanwezige moslaag is intact gelaten. Enkele malen is de els teruggesnoeid om het telwerk van de bladeren beperkt te houden. Hierdoor wisselt de maximale LAI_{els} per jaar. Als indicator van de LAI_{riet} is de riethoogte gemeten. Door de gemeten waarden LAI_{els} en LAI_{riet} zijn 2^e orde polynomen berekend (EXCEL) waarmee het verloop van de *LAI* door het seizoen kan worden geïnterpoleerd tot dagwaarden.

Modellen

De gemeten waterpeilen in de lysimeters zijn vergeleken met eenvoudige modellen van de waterbalans met als invoer gemeten neerslag en uit gemeten data berekende referentieverdamping ("Makkink") per dag. Hierbij is uitgegaan van een lineaire correlatie tussen *E* en E_{ref} zoals ook door Lafleur (1990) en Koerselman en Beltman (1988) is gevonden

Model 1

$$H_t = H_{t-1} + P_t - f \cdot E_{ref_t} \quad [m] \quad [1]$$

Waarbij

- H* : waterpeil [m]
- P* : neerslag [m]
- E_{ref} : referentieverdamping volgens Makkink [m]
- f* : reductiefactor [-]

De reductiefactor is bepaald uit:

$$f = \frac{H_1 - H_n + \sum_{t=1}^n P_t}{\sum_{t=1}^n E_{ref_t}} \quad [2]$$

met *n* het dagnummer van de laatste modeldag.

Model 2

Tevens is voor de lysimeters "els" en "riet" een voorwaartse modellering uitgevoerd waarbij de evapotranspiratie is gesplitst (Kool e.a. 2014) in evaporatie (*Es*) en transpiratie (*Et*):

$$H_t = H_{t-1} + P_t - (ES_t + Et_t) \quad [m] \quad [3]$$

$$\text{Met :} \quad ES_t = a \cdot e^{b \cdot Temp_t} \quad [m] \quad [4]$$

$$Et_t = c \cdot LAI_t \cdot E_{ref_t} \quad [m] \quad [5]$$

Temp: temperatuur bodemwater in lysimeter "riet" op 0,3 m diepte (°C); *LAI*: Leaf Area Index (L²/L² lysimeter); *a*, *b*, en *c* parameters bepaald door ijking.

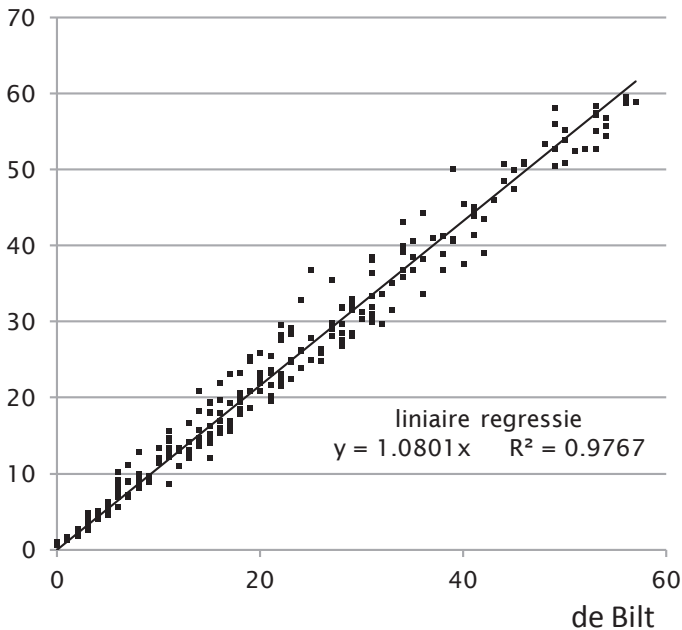
Resultaten

Referentieverdamping en neerslag

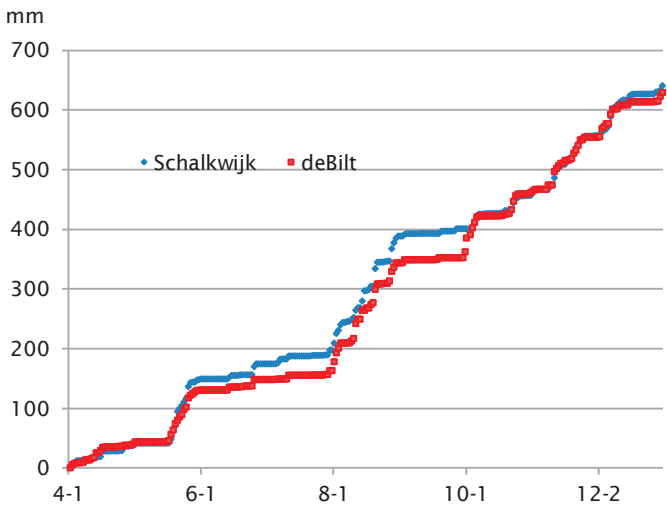
Voor de berekening en modellering van de evapotranspiratie is gebruik gemaakt van de referentieverdamping (E_{ref}) volgens Makkink (Hooghart en Lablans, 1988). Voordeel van deze methode is dat de berekening eenvoudig is en goed toepasbaar is voor vele gebieden. De door Makkink ontwikkelde empirische vergelijking gebruikt de luchttemperatuur op standaardhoogte en de inkomende straling, alsmede 4 constanten. In een studie van Xu en Chen (2005) zijn 7 veelgebruikte modellen voor berekening van de E vergeleken met de gemeten E van een weegbare lysimeter. Hieruit kwam de methode Makkink als een van de beste naar voren. De berekende E_{ref} van de onderzoeklocatie is voor het meetjaar 2006 vergeleken met die welke door het KNMI is berekend voor het station De Bilt, circa 14 km ten noorden van de onderzoeklocatie. Hoewel de dagwaarden soms aanzienlijk verschillen blijkt er over de gehele beschouwde periode toch een goede overeenkomst (Afbeelding 5), zodat aangenomen is dat meetgegevens (temperatuur en straling) correct waren.

Ook de geregistreeerde neerslag over 2006 blijkt goeddeels overeen te komen met die van De Bilt (Afbeelding 6).

veldstation



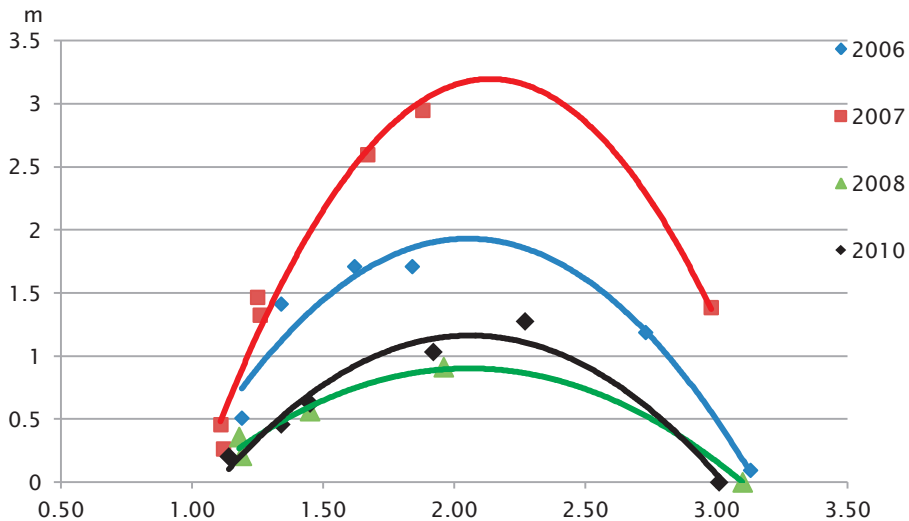
Afbeelding 5: Referentieverdamping (Eref: Makkink) op de onderzoeklocatie in vergelijking tot KNMI station de Bilt; eenheden: 0.1 mmd-1; Periode 4/04 - 9/12 2006.



Afbeelding 6: Op de onderzoeklocatie "Schalkwijk" en op KNMI station De Bilt gemeten cumulatieve neerslag over de periode 1/04 - 31/12 2006.

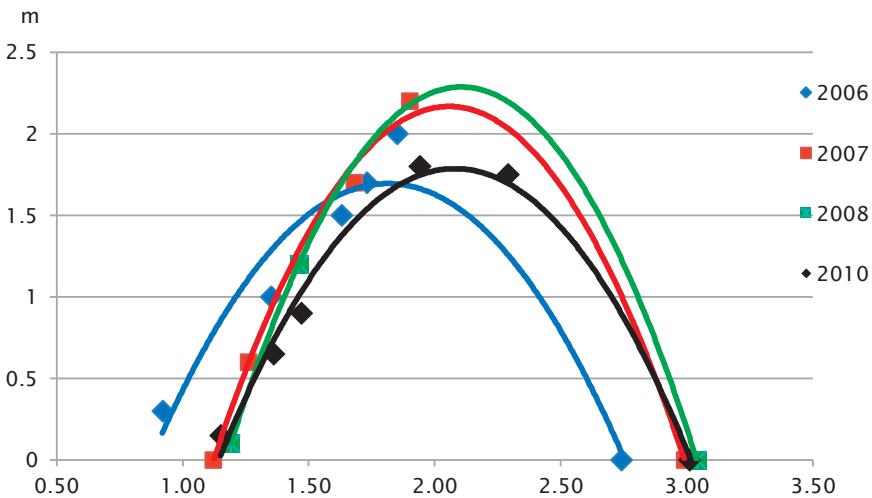
LAI

De 2^e orde polynomen door de gemeten waarden (Afbeelding 7) beschrijven het seizoenverloop van de LAI goed ($R^2 > 0,92$). Een geleidelijke toename van het bladoppervlak van de els van 1 april tot 1 juli wordt na een maximum in begin augustus en vanaf circa 1 september gevolgd door een geleidelijke afname tot circa 1 november. De LAI_{els} verschilt per jaar. In 2007 was de LAI_{els} aanmerkelijk groter dan in 2006 door groei van de els. In het voorjaar van 2008 is de els flink teruggesnoeid om stress van de els, die immers in een beperkte ruimte groeit, te voorkomen en tevens om het telwerk te beperken. Omdat ook in 2010 enkele takken van de els zijn verwijderd was de LAI_{els} toename ten opzichte van 2008 klein.



Afbeelding 7: Gemeten bladoppervlak (LAI) van de els (punten) en hieruit bepaalde 2^e orde polynoom van het seizoenverloop van de LAI. Y-as: LAI, X-as: dagnr/100.

De LAI_{riet} van lysimeter "riet" is niet bepaald door tellen van de bladeren, maar door periodieke meting van de riethoogte. Gedurende het seizoen neemt de riethoogte geleidelijk toe waarbij het aantal bladeren aan elke rietstengel evenredig toeneemt. In augustus vergelen de onderste bladeren en in de bloeitijd van het riet van eind augustus tot begin september is meer dan de helft van de bladeren van de rietstengels geel geworden. Na de bloei worden geleidelijk alle rietbladeren geel, de bovenste bladeren het laatst (begin oktober). Omdat vergeelde rietbladeren niet meer assimileren tellen die niet meer mee bij de LAI_{riet} . De riethoogte kan door deze ontwikkeling als een benadering van de riet LAI worden gezien (Read e.a., 2008). In Afbeelding 8 zijn de polynomen door de gemeten riethoogtes gedurende 2006, 2007, 2008 en 2010 uitgezet. Nadat het riet totaal geel is geworden blijven de rietstengels staan. In de winter is het riet in de lysimeter afgeknipt, naar analogie met de gebruikelijke rietlandcultuur. De riethoogte en daardoor de LAI_{riet} varieert tussen de jaren weinig. In 2008 was het riet hoger, maar dat betreft slechts één meting.



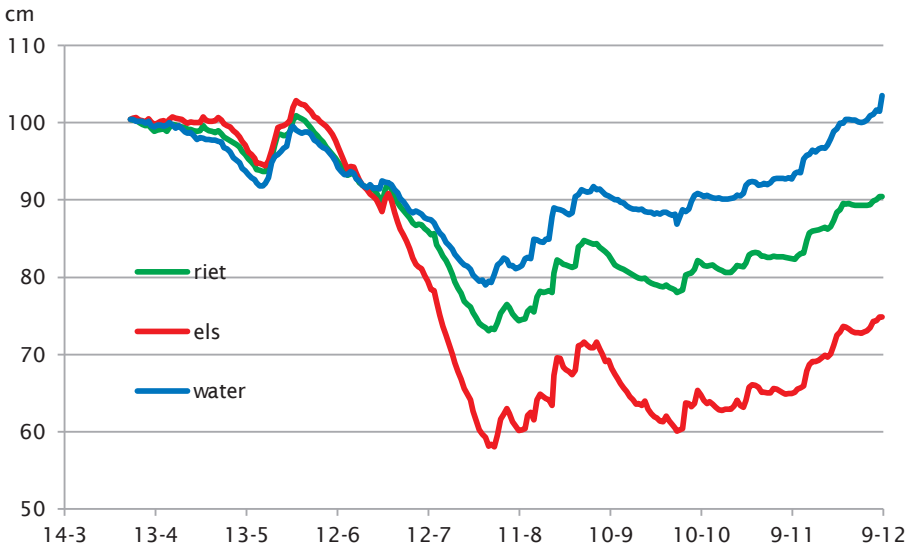
Afbeelding 8: Gemeten hoogte (Hriet) van het riet (punten) en hieruit bepaalde 2^e orde polynoom van het seizoenverloop van de LAI. Y-as: Hriet, X-as: dagnr/100 .

Geregistreerd waterpeilverloop in de lysimeters in 2006

In Afbeelding 9 is het peilverloop in de lysimeters weergegeven. De geregistreerde waterstanden zijn gecorrigeerd voor uitgevoerde peilaanpassingen bij te hoge of te lage waterstanden.

Het effect van peilstijging door neerslag is in alle drie vrijwel gelijk, maar de peildaling in droge perioden verschilt tussen de lysimeters. De verschillen worden verklaard door transpiratie (E_t) van de rietplanten en van de els en de verdamping (E_s) van de wortelmatten.

Met name in de zomerperiode (1 juli-30 september) blijkt de transpiratie van de lysimeter "els" groter dan die van lysimeter "riet" en die van "riet" groter dan van lysimeter "water", met als gevolg dat de waterstand in de lysimeter "els" 3 maal meer daalde dan die van open water en "riet" 1,5 maal meer dan van open water. In het voorjaar (1 april - 30 juni) was de volgorde omgekeerd (water>riet>els).



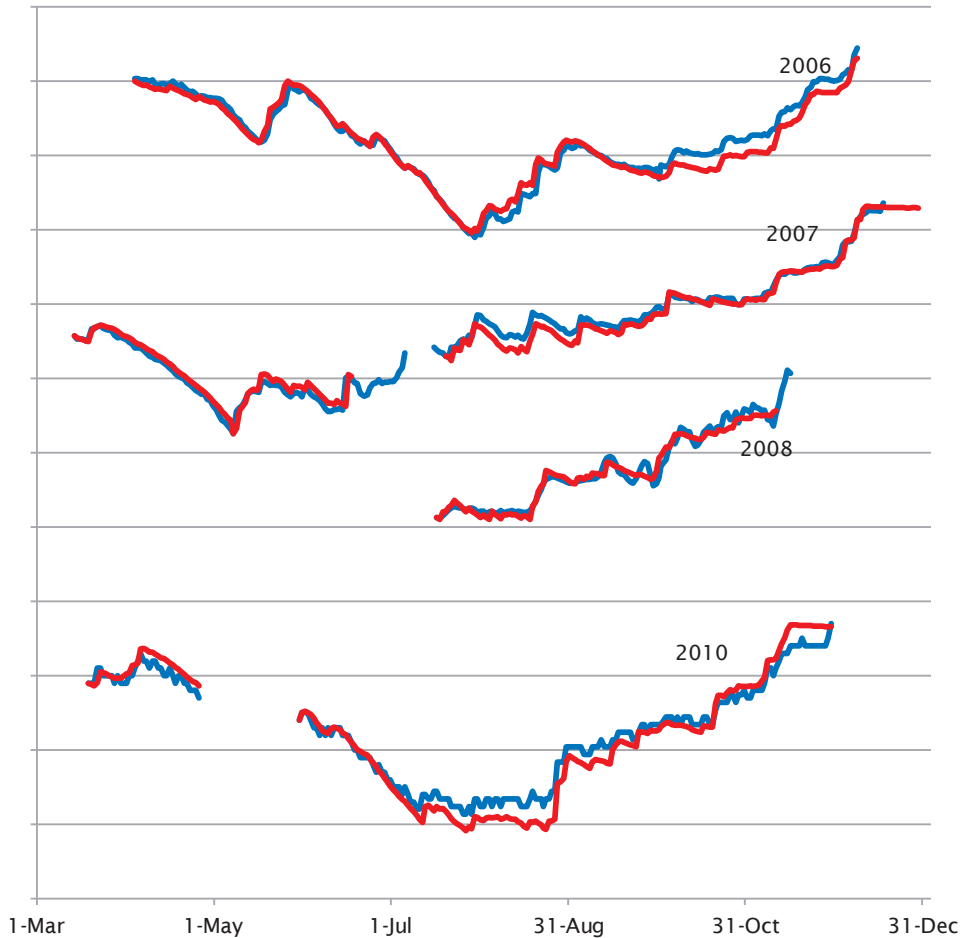
Afbeelding 9: Waterpeilverloop van de lysimeters "water", "riet" en "els" gedurende de periode 14/3 - 9/12 2006. Beginpeil (14/3) gelijkgesteld.

Modelresultaten

Lysimeter "water"

Met het model [1] is het verloop van de waterstand in de lysimeter "water" voorwaarts bepaald (Afbeelding 10). De waarde van de verdampingreductiefactor ten opzichte van de referentieverdamping volgens Makkink is bepaald met [2]. Het model presteert goed in 2006 ($H_{water}=0,9974H_{model}$, $R^2=0,9555$). De beste overeenstemming werd bereikt in het droge voorjaar en begin van de zomer. Gedurende perioden met neerslag is het resultaat iets minder goed. In de natte periode van de zomer wordt een iets te hoge waterstand berekend, maar aan het begin van de daaropvolgende droge periode komt de voorspelde waterstand toch weer overeen met de geregistreerde standen. In het najaar blijkt de verdamping iets kleiner dan die van het model. In 2007 was van 16/6 tot 19/7 de logger uitgevallen zodat de referentieverdamping en neerslaggegevens ontbreken. Op 19/7 is de beginwaarde van de modelwaterstand gelijkgesteld aan de gemeten waarden. In juli en augustus werden iets te lage waterstanden berekend. Over de gehele meetperiode voorspelde het model de waterstanden goed ($H_{water}=0,9982H_{model}$, $R^2=0,9758$).

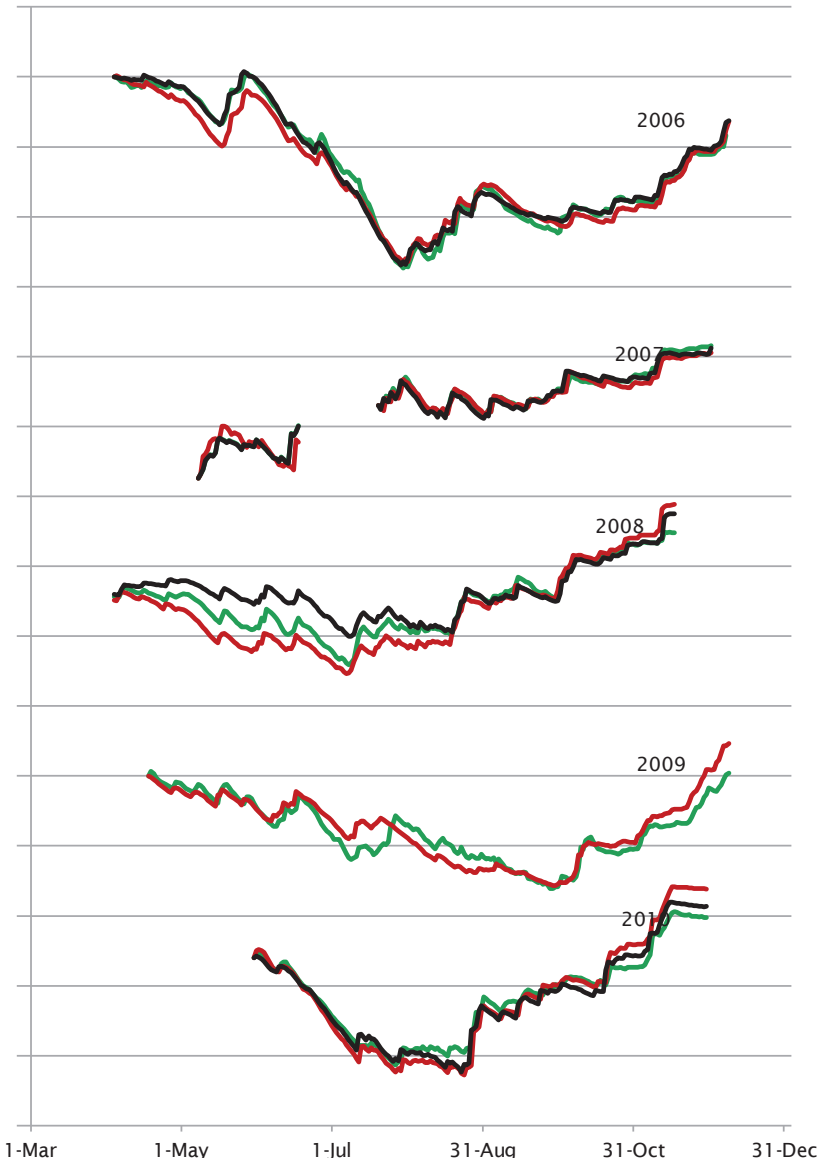
In 2008 zijn geen modelwaterstanden berekend voorafgaande aan 17/7 omdat er geen betrouwbare gegevens van de neerslag zijn verkregen. Daarna presteert het model overeenkomstig de gemeten waterstanden ($H_{water}=0,9990H_{model}$, $R^2=0,9712$). In 2010 ontbreken van 25/4 tot 30/5 invoergegevens door uitval van de datalogger, zodat voor die periode geen modelberekeningen zijn uitgevoerd. Op 31/5 is het model opnieuw gestart met de gemeten waterstand. Ook voor deze meetperiode voorspelde het model de gemeten waterstanden goed ($H_{water}=0,9960H_{model}$, $R^2=0,9601$). In de zomer periode 11/7 – 15/9 waren de voorspelde waterstanden lager dan gemeten



Afbeelding 10.: Geregistreeerde waterstand in lysimeter "water" (blauw) en resultaat model1 (rood) $E_{water} = f^* E_{ref}$, met 2006 $f=0,96$; 2007 $f=0,95$; 2008 $f=0,9$; 2010 $f=0,94$; Eenheid op de Y-as=0,1 m. De startwaarden van de model waterstanden zijn gelijkgesteld aan de gemeten waterstanden.

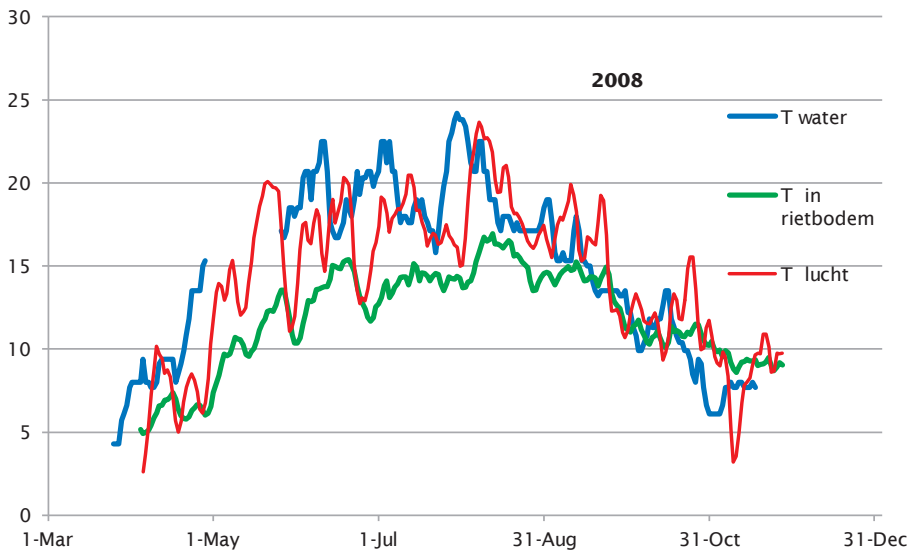
Lysimeter "riet"

Met model1 [1] en met model2 [3] zijn peilverlopen gemodelleerd (Afbeelding 11). De met [2] berekende vaste gewasfactoren verschilden per jaar (Tabel 1). Aan het begin van de meetperioden in het voorjaar werden de waterstanden minder goed voorspeld in 2006 en 2008, terwijl aan het eind van de meetperioden in de herfst te hoge standen werden gemodelleerd voor de jaren 2008, 2009 en 2010. Kennelijk werd de evapotranspiratie in voorjaar overschat en in najaar onderschat.



Afbeelding 11: Geregistreeerde waterstand in lysimeter "riet" (groen) en resultaat model1 (rood) $E_{water} = f * E_{ref}$; met 2006 $f=1,12$; 2007 $f=1,15$; 2008 $f=0,76$; 2009 $f=0,75$; 2010 $f=1,0$; Zwart: model2 (zie tekst). Eenheid op de Y-as=0,1 m. De startwaarden van de gemodelleerde waterstanden zijn gelijkgesteld aan de gemeten waterstanden.

De in [1] gebruikte Makkink verdamping (E_{ref}) is gebaseerd op de evapotranspiratie van een grasland goed voorzien van water in de zomerperiode (Hooghart J.C. en W.N. Lablans, 1988). In de winter is de openwaterverdamping groter dan de gewasverdamping en wordt het gebruik van Makkink's referentieverdamping afgeraden door Spijksma e.a. (1996). Mede daarom is ervoor gekozen om de voorjaar- en najaarsituatie de E_{ref} niet te gebruiken bij modellering volgens [2]. In plaats daarvan is deelmodel Es [4] gebruikt. Hierbij is er van uitgegaan dat het riet na vergelijking van de rietbladeren nog lange tijd de temperatuur in de wortelmat buffert, zodat deze relatief warm blijft (Afbeelding 12), hetgeen een potentieel hogere bodemverdamping kan veroorzaken. In het voorjaar is het omgekeerde het geval, zeker waar het gemaaid rietland betreft. De constanten in [4] ($a=0,04$) en ($b=0,05$) zijn door ijking bepaald met de geregistreerde peilen in de lysimeter "riet" gedurende de periode 1/10/2006-8/12/2006, toen alle bladeren van het riet vergeeld waren en er geen transpiratie door riet zal zijn opgetreden ($H_{mod2}=0,9593H_{gemeten}$; $R^2=0,9505$, $N=67$).



Afbeelding 12: In 2008 gemeten temperatuurverloop in lysimeter "water" (T water) op 0,8 m. diepte; in lysimeter "riet" (T in rietbod. op 0,3 m. diep; op 2 m. boven de rietbod. (T lucht). T in °C.

De transpiratie door riet is in model2 berekend volgens [5]. In de winter is het riet in de lysimeter, net als gebruikelijk in het omringende rietland afgemaaid. In het voorjaar neemt de LAI_{riet} geleidelijk toe tot de bloei einde zomer, waarna de rietbladeren snel vergelen en de transpiratie stopt. De LAI_{riet} bereikt maxima van 1,7-2,3 (Afbeelding 8). De resultaten van model2 waren iets beter dan die van model1 (Afbeelding 11, Tabel 1). Zowel de waterstanden in voorjaar als in najaar werden beter berekend dan met model1 [1]. Van 2008 zijn er slechts 3 waarnemingen van de riethoogte zodat het goed mogelijk is dat de maximale LAI_{riet} kleiner was dan berekend en daardoor de transpiratie geringer dan berekend. Dit kan verklaren waarom de met model2 berekende waterstanden tot medio augustus (2008) hoger waren dan gemeten.

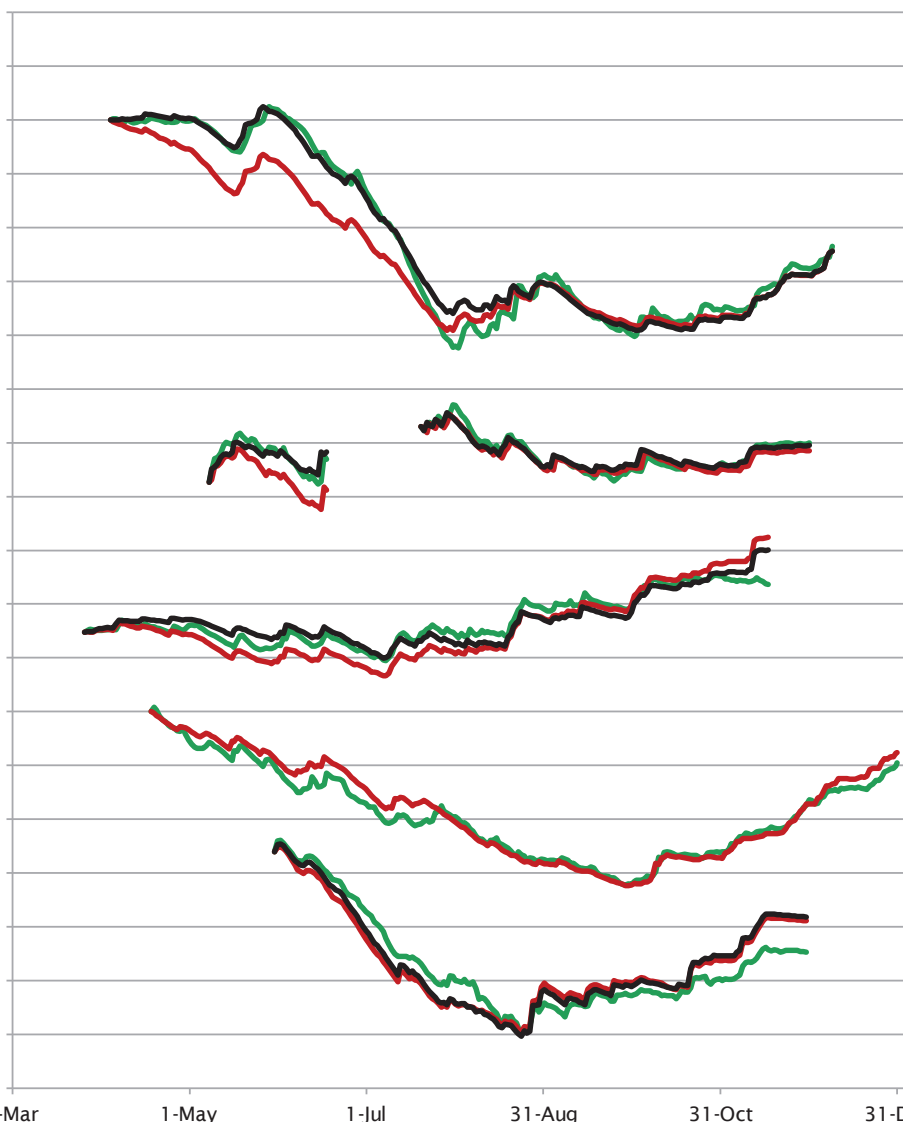
Lysimeter "els"

Net als bij "riet" werden de voorjaarspeilen met [1] te laag berekend, behalve in 2009 (Afbeelding 13). De verdampingsreductiefactor (f_{els}) was gemiddeld 1.27 (Tabel 1), zonder het afwijkende jaar 2008 $f_{els}=1.41$ De variatie in deze factor wordt vooral veroorzaakt door de variatie in LAI_{els} welke veel groter was dan bij riet.

Tabel 1: Model parameters $H_{mod1}=P \cdot f_{ref} \cdot E_{ref}$ $H_{mod2}=P \cdot (a \cdot e^{b \cdot T_{bod}} + c \cdot E_{ref} \cdot LAI)$; H =waterpeil; P =neerslag $a=0,04$; $b=0,05$; R^2 regressie coëfficiënt van lineaire regressiemodel:
 $H_{model}=g \cdot H_{gemeten}$

Year	riet						
	f_{riet}	g	R^2	c_{riet}	g	R^2	max LAI
2006	1,12	0,9914	0,96	0,80	0,9972	0,9802	1,7
2007	1,15	0,9960	0,9734	0,70	0,9955	0,9593	2,2
2008	0,76	0,99	0,9231	0,31	1,0123	0,7625	2,3
2009	0,75	1,011	0,8419	-	-	-	-
2010	1,00	1,0006	0,956	0,47	1,005	0,9605	1,8
Gemiddeld	0,96			0,57			2,0
St.dev	0,19			0,22			0,3
Mediaan	1,00			0,59			1,82.0
	els						
	f_{els}	g	R^2	c_{els}	g	R^2	max LAI
2006	1,43	0,9563	0,9194	0,85	0,9963	0,9809	1,9
2007	1,66	0,9893	0,7372	0,52	0,9999	0,7831	3,2
2008	0,70	0,9906	0,8526	0,72	1,0007	0,8455	0,8
2009	1,05	1,0104	0,9706	-		-	
2010	1,50	0,9857	0,9259	1,24	1,0079	0,9530	1,3
mean	1,27			0,83			1,8
St.dev	0,39			0,30			1,0
Mediaan	1,43			0,79			1,6

In model2 [3] is net als bij lysimeter "riet" de E gesplitst in "bodem"verdamping (E_s) en (E_t) transpiratie. De bodemverdamping van de lysimeter "riet" is ook gebruikt in model2(els). Met model2 werden de waterstanden aanmerkelijk beter berekend dan met model1, behalve in 2008 toen LAI klein was (Tabel 2).



Afbeelding 13: Geregistreerde waterstand in lysimeter "els" (groen) en resultaat model (rood) $E_{\text{water}} = f * E_{\text{ref}}$; met 2006 $f=1,43$; 2007 $f=1,66$; 2008 $f=0,70$; 2009 $f=1,05$; 2010 $f=1,50$; Zwart: model2 (zie tekst). Eenheid op de Y-as =0,1 m. De startwaarden van de gemodelleerde waterstanden zijn gelijkgesteld aan de gemeten waterstanden.

Discussie

Het gebruik van containers als lysimeters

Spieksma e.a. (1997) voeren een aantal bezwaren op tegen het gebruik van (weegbare) lysimeters. Het belangrijkste bezwaar betreft de temperatuuruitwisseling die beperkt is bij weegbare lysimeters. Dit probleem doet zich niet voor bij de hier gebruikte dun stalen (RVS) containers afgezonken in water. Een ander bezwaar betreft

het opdrogen van de strooisellaag wat tot vermindering van de verdamping leidt (Spieksma e.a., 1997). Dit is niet van toepassing omdat de "bodem", inclusief een dunne strooisellaag altijd nat is.

Openwaterverdamping (E_{water})

De verdamping van de lysimeter "water" was kleiner dan die berekend volgens Mak-kink. Gemiddeld is de reductie over de vier meetperioden met de modellen bepaald op 0.94 (MIN 0.90, MAX 0.96). De luchttemperatuur voor berekening van de Mak-kink verdamping is bepaald net boven de maximale riethoogte (2 m boven water/ moerasbodem), hetgeen 0,5 m hoger is dan de standaard hoogte. De temperatuur boven riet correleert goed met de temperatuur gemeten op 0,5 m. boven water ($T_{boven riet} = 0,9263T_{boven water}$, $R^2=0,9275$, $N=184$, jaar 2010).

Uit dit onderzoek blijkt dat de verhouding E_{water}/E_{ref} beduidend lager is dan de verhouding E_o/E_{ref} die voor de periode april t/m september volgens Hooghart en Lablans (1988) en door De Bruin en Lablans (1998) zijn berekend (1,263 respectievelijk 1,25). Kennelijk is de gemeten E_{water} niet vergelijkbaar met berekende waarden voor E_o . Een verklaring hiervoor ontbreekt.

Evapotranspiratie riet (E_{riet})

In de berekening van de E van riet is de LAI_{riet} benaderd met de riethoogte bij gebrek aan betere gegevens. Dit verklaart mogelijk de variatie in de extra parameter (c_{riet} zie Tabel 2). De uit de gemeten riethoogtes berekende LAI_{riet} varieert niet veel tussen de jaren. Ook was er geen sprake van verschil in hoogte tussen het riet in de lysimeter en in het omgevende rietveld. Mogelijk zijn er wel verschillen opgetreden tussen het aantal rietstengels in de lysimeter over de jaren, maar daar zijn geen waarnemingen van gedaan.

Evapotranspiratie els (E_{els})

De met [2] berekende E_{els} waarden komen beter overeen met de waargenomen waterstandverandering in lysimeter "els" dan met [1] met een vaste gewasfactor. De gebruikte vergelijkingen [4] en [5] zijn eenvoudige benaderingen. In de literatuur zijn geen gegevens van de gewasverdamping van els gepubliceerd, zodat de gebruikte methode niet getoetst kan worden. Aangezien zowel de openwaterverdamping als de E_{riet} goed worden berekend met [2] kan worden verondersteld dat ook E_{els} goed is voorspeld indien de gemodelleerde waterstanden overeen komen met de gemeten waterstanden.

Tabel 2. Overzicht modelresultaten van de jaren 2006, 2007, 2008 en 2010: mei-oktober.

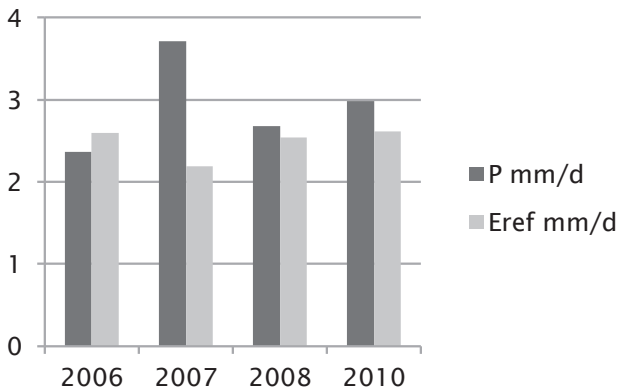
	2006			2007			2008			2010*		
	Eref	E riet	E els	Eref	E riet	E els	Eref	E riet	E els	Eref	E riet	E els
som mm	512,8	582,6	859,7	351,0	354,8	501,7	502,8	431,8	398,2	436,1	442,7	653,1
gemiddelde mm/d	2,8	3,2	4,7	2,6	2,6	3,6	2,7	2,3	2,2	2,9	2,9	4,3
st dev (gemiddelde)	1,3	1,8	2,3	0,9	1,3	1,4	1,1	0,9	0,8	1,5	1,2	2,4

*periode juni-oktober

LAI_{els} varieerde zodat de uitkomsten niet direct elders toegepast kunnen worden zonder LAI metingen te doen. Elzen kunnen in een moerasrietland een hoogte van meer dan 5 m bereiken, met een LAI die vele malen groter zal zijn dan die van de els in de lysimeter "els". Dat betekent dat de ET van een elzenbroekbos nog aanzienlijk groter kan zijn dan die van de meest verdampende landschapstypen volgens Spijksma e.a. (1996), i.c. naaldbos en natte hoogveenrestanten ($0,65 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$). Hier zal bij hydrologische modellering rekening mee gehouden dienen te worden.

Gewasfactor E_{riet}/E_w

Voor het jaar 2008 presteren modellen volgens model2 minder. Een mogelijke verklaring hiervoor was dat over de periode (1/5 - 17/11) van 2008 veel meer dagen met neerslag had dan dezelfde periode van de overige jaren (2006: 102; 2007: 109; 2008: 123, 2010: 103), hoewel het een gemiddeld jaar was, gezien de neerslagsom en som van E_{ref} (Afbeelding 14). Mogelijk wordt de E_{ref} en of de transpiratie (E_t) overschat voor dagen met neerslag (hogere luchtvochtigheid). Het gegevensbestand laat echter een nadere analyse van dit effect niet toe.



Afbeelding 14: Gemiddelde neerslag en referentieverdamping: over de periode 1/5 - 17/11 in mm/d.

De met [4] berekende E_{riet} (Tabel 3) komen overeen met die van Priban en Ondok (1985) welke een gemiddelde E over 3 jaar berekenden op basis van lysimeteronderzoek voor een zeggegrasland in Tsjechië, met een range van $0,00283\text{-}0,00345 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Lafleur (1990) vond E $0,0026\text{-}0,0031 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Herbst en Kappen (1998) bepaalden van een rietveld aan de rand van een meer de ratio $E(\text{riet})/E(\text{meer})$ op 1,5 tot 2,0. Xu en Ma (2011) berekenden met hun lysimetercontainers in een Chinees rietland voor twee jaren een ratio van 2,67 en 2,85.

Read e.a. (2008) hebben met vrijwel vergelijkbare lysimeters (containers) de E gemeten in verschillende grote rietlanden in de UK. Zij berekenden E_{riet}/E_{ref} (E_{ref} volgens een UK versie van Penman-Monteith) van 0,3-1,0 hetgeen minder is dan de hier berekende waarden (0,8-1,3). De door Read e.a. (2008) gebruikte lysimeters die waren gevuld met mineraal bodemmateriaal en daarop blokken van bodem met rietwortels. De transpiratie kan daarom mogelijk enigszins beperkt zijn. Acreman e.a. (2003) berekenden met Penman (E_w) en eddy correlation (E_a) aanmerkelijk hogere waarden van E_a/E_w (1,2-2,9) voor rietland in Engeland dan in dit onderzoek.

Voor riet varieert de gewasfactor (mei-oktober E/E_{ref} : 0,7-1,2 gemiddeld 1,04; $SD=0,27$; $N=24$). Dat komt vrijwel overeen met die van pijpestro gevonden door

Spieksma et al. (1997) bij vergelijking van de gewasfactor E_{SWAPS}/E_{ref} (SWAPS: Ashby e.a. 1996). De lagere waarden (0,7-0,8) van E/E_{ref} (E_{ref} : Penman) door Koerselman en Beltman (1988) gemeten met ingegraven lysimeters zijn te verklaren uit de lagere vegetatie (*Carex* sp.) met kleinere *LAI* dan riet.

Lysimeters in deze opstelling zijn effectief gebleken in het bepalen van de *E* en gewasfactoren voor natte systemen. Het verdient aanbeveling ook voor droge condities een vergelijkbare opstelling, met aanpassingen voor afvoer van percolatiewater, te maken. De kosten zijn een fractie van die vergeleken met weegbare lysimeters (zie bijvoorbeeld Voortman e.a. 2015).

Conclusies

- Door waterpeilcontrole van ingegraven containers ("lysimeters") kunnen goede schattingen van $E_{actueel}$ en gewasfactoren worden gemaakt.
- Over de periode mei-oktober waren E_{els} van lysimeter "els" en E_{riet} van lysimeter "riet" gemiddeld groter dan E_{water} van lysimeter "water" (2,2-4,7, 2,3-3,2 resp. 1,9-3,0 mmd¹).
- De gewasverdamping van de els (E_{els}) was beduidend groter dan die van riet (E_{riet}) en die van openwaterverdamping (E_{water}).
- De verhouding E_{water}/E_{ref} over de 4 jaren was gemiddeld 0,94 (Stdev 0,03 Mediaan 0,95) en de gemiddelde gewasfactoren voor E_{riet}/E_{ref} waren voor riet 0,96 (Stdev 0,19 Mediaan 1,00) en E_{els}/E_{ref} voor els was 1,27 (Stdev 0,39 Mediaan 1,43). Deze verschillen zijn toegeschreven aan het effect van transpiratie via gebruik van de modelparameter *LAI*.
- De voorspelde waterstanden in de lysimeters "riet" en vooral die van "els" werden beter bij gesplitste berekening van de evapotranspiratie (*E*) in bodemverdamping (*Es*) en gewasverdamping (*Et*) dan volgens de gewasfactormethode.
- Het verdient aanbeveling de *E* van broekbossen van els, wilg en berk nader te onderzoeken

Dankwoord

Het onderzoek is mogelijk gemaakt dank zij de enthousiaste ondersteuning van het technisch personeel Chris Roosendaal & Jaap van Barneveld van het Laboratorium Fysische Geografie bij de constructie van de RVS lysimeterbakken, het plaatsen en het oplossen van diverse problemen met de meetapparatuur en dataloggers tijdens de meetperioden.

Literatuur

Acreman M.C., R.J. Harding, C.R. Lloyd en D.D. McNeil (2003) Evapotranspiration characteristics of wetlands: experience from a wet grassland and a reedbed using eddy correlation measurement; *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7, 11-21.

Ashby M., E.J. Moors, M. Ogink-Hendriks, P. Kabat en A.J. Dolman (1996) Technical description of the soil vegetation atmosphere model SWAPS; Wienand Staring Centre, Wageningen.

Bartholomeus R. en B. Voortman en J.P. Witte (2013) Metingen en proceskennis vereist voor nauwkeurige verdampingsberekeningen in grondwatermodellen; *Stromingen* 17 nr. 2 37-52.

Bruin H.A.R. de, en W.N. Lablans (1998) Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation; *Hydrol. Process.* 12, 1053-1062.

Hooghart J.C. en W.N. Lablans (eds) (1988) Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen; Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; Rapporten en Nota's no. 19.

Koerselman W. en B. Beltman. Evapotranspiration from fens in relation to Penman's potential free water evapotranspiration and pan evaporation; *Aquatic Botany* 31: 307-320.

Kool D., N. Agam, N. Lazarovitch, J.L. Heitman, T.J. Sauer en A. Ben-Gal (2014) A review of approaches for evapotranspiration partitioning; *Agricultural and Forest Meteorology* 184, 56-70.

Lafleur P.M. (1990) Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces; *Aquatic Botany*, 37, 341-353.

Makkink G.F. (1957) Testing the Penman-formula by means of lysimeters; *Journal Int. Wat. Eng. London*, 11, 277-288.

Massop H.Th.L., P.J.T. van Bakel, T. Kroon, J.G. Kroes, A. Tiktak, en W. Werkman (2005) Op zoek naar de 'ware' neerslag; *Alterra-rapport 1158*; Reeks Landelijk Gebied 28, Wageningen, 108 p.

Mohamed Y.A., W.G.M. Bastiaansen, H.H.G. Savenije, B.J.J.M. van den Hurk en C.M. Finlayson (2012) Wetland versus open water evaporation: An analyses and literature review; *Physics and Chemistry of the Earth* 47-48, 114-121.

Penman H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass; *Proceedings. Royal Society, London* 193, 120-146.

Priban K. en J.P. Ondok (1985) Heat balance components and evapotranspiration from a sedge-grass marsh; *Folia Geobot Phytotaxon*, 20, 41-56.

Read K.E., P.D. Hedges en P.M. Fermor (2008) Monthly evapotranspiration coefficients of large reed bed habitats in the United Kingdom; In: J.Vymazal(ed.) *Wastewater treatment, plant dynamics and managements in constructed and natural wetlands*, Springer, p99-109.

Spieksma J.F.M., A.J. Dolman en J.M. Schouwenaars (1996) De parameterisatie van de verdamping van natuurterreinen in hydrologische modellen; Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging, rapport 4-2, RIZA, Lelystad.

Spieksma J.F.M., A.J. Dolman en J.M. Schouwenaars (1997) De verdamping van natuurterreinen; Stromingen (3), Nr 1, p 5-16.

Voortman B.R., R.P. Bartholomeus, S.E.A.T.M. van der Zee, M.F.P. Bierkens en J.P.M. Witte (2015) Quantifying energy and water fluxes in dry dune ecosystems of the Netherlands; Journal Hydrology and Earth Systsystem Sciences; doi:10.5194/hessd-12-4541-2015.

Xu C.Y. en D.Chen (2005) Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany; Hydrol Process, DOI: 10.1002/hyp.5853.

Xu S. en T. Ma (2011) Evapotranspiration observation and data analyses in reed swamp wetlands; IAHS-AISH Publication Volume 344, 239-244