

# Een generieke methode voor het berekenen van potentiële gewasverdamping op basis van gemeten gewaseigenschappen

BERNARD VOORTMAN, JOOST SLEIDERINK, DION VAN DEIJL, NYNCKE HOEKSTRA,  
MERIJN VAN DEN HOUT, JOP VAN DER WEL, NICK VAN EEKEREN EN GÉ VAN DEN EERTWEGH

*Eén van de grootste posten in de waterbalans is de verdamping. Om een goed beeld te krijgen van de wateropname van gewassen en het watergebruik in de landbouw zijn verdampingscijfers onmisbaar. Door de opkomst van nieuwe, meer droogte-resistente gewassen en mede door de hoge kosten van verdampingsmetingen zijn verdampingscijfers niet altijd voorhanden. Daarom presenteren we in dit artikel een middenweg tussen meten en modelleren om de potentiële verdamping van verschillende gewassen te kunnen bepalen. De methode kan gebruikt worden in combinatie met een hydrologisch model als alternatief voor het direct meten van verdamping en vervult daarmee een grote behoefte om op basis van simpele veldmetingen betrouwbare verdampingscijfers te genereren.*

Artikel

## Inleiding

Verdamping is een grote post in de waterbalans. In Nederland verdampt naar schatting ongeveer tweederde van de neerslag. Omdat een relatief klein deel van de neerslag doorsijpelt naar het grondwater tellen fouten in de berekende verdamping zwaar door in de berekende grondwaterstand. Doordat we bijvoorbeeld grondwatermodellen kalibreren, vallen deze fouten niet altijd op, met verkeerd geparametriseerde modellen tot gevolg. Accurate verdampingscijfers zijn daarom essentieel voor het waterbeheer (Van den Eertwegh en De Bruin, 2017). Verdamping is niet alleen een post in de waterbalans. Verdamping vormt ook een bepalend proces voor de vele afgeleiden zoals hittevorming in de stad, zwel- en krimpdynamiek van bodems, natuurbrandgevoeligheid en gewasproductie. Ondanks de grote rol van verdamping in vele processen zijn directe verdampingsmetingen beperkt voorhanden. Verdampingsmetingen realiseren is namelijk complex en kostbaar. Tevens ontbreekt in Nederland een organisatie die zich ontfermt over verdampingsmetingen. Daardoor is de validatie van verdampingsberekeningen gebrekkig. Tegelijkertijd zijn er vele verschillende combinaties van gewasstype, bodemtype, hydrologie en meteorologie waardoor het ondoenlijk is om elke situatie te bemeten. We blijven daarom afhankelijk van modellen (NHV, 2015).

Directe verdampingsmetingen zijn weliswaar lastig te realiseren door de kosten en de complexiteit, achterliggende processen zijn een stuk eenvoudiger te bemeten. In dit artikel presenteren we een methode om met behulp van eenvoudige veldmetingen van gewashoogte en bladoppervlak de verdamping te

berekenen. Voor het doorrekenen van verdampingscijfers hebben we gebruik gemaakt van het Penman-Monteithmodel (vergelijking 1), waarmee internationaal vaak de potentiële verdamping wordt berekend. Dit model heeft als voordeel dat gewashoogte en bladoppervlak eenvoudig geïntegreerd kunnen worden in de berekening. Tegelijkertijd zijn er ook nadelen aan de Penman-Monteithvergelijking. Zo is er geen duidelijke grens aan de beschikbare energie, wat vaak leidt tot een overschatting van de potentiële verdamping, en zijn meethoogtes van meteorologische variabelen niet afgestemd op de hoogte van het gewas. Deze problemen hebben we ondervangen door meteorologische metingen te corrigeren voor de meethoogte en de potentiële verdamping te begrenzen door een schatting te maken van de beschikbare energie.

In dit artikel proberen we een middenweg te vinden tussen meten en modelleren. De methode is ontwikkeld in de context van een gewassenexperiment, in De Moer en Moergestel, dat is gerelateerd aan het internationale netwerk LegacyNet en het Nederlandse TKI-KLIMAP-project. In deze projecten wordt onder andere het verband tussen drogestofopbrengst en plantverdamping (transpiratie) onderzocht. Voor zes verschillende soorten gewassen zijn metingen en berekeningen gedaan: Engels raaigras, rode klaver, smalle weegbree, cichorei, mais en sorghum. In dit artikel presenteren we naast de methode ook de potentiële verdampingscijfers van de betreffende gewassen. Een aantal modellen en onderdelen die we presenteren zijn niet nieuw, maar de combinatie van modellen en ondersteunende veldmetingen wel. Met deze methode geven we invulling aan de wens om verdampingscijfers te kunnen genereren op basis van eenvoudige veldmetingen.

## Methoden

In essentie parametriseren we een verdampingsmodel op basis van veldmetingen om de potentiële verdamping te bepalen. Vervolgens kan met een hydrologisch model de werkelijke verdamping worden uitgerekend die in het geval van watertekorten lager ligt dan de potentiële verdamping. De eerste stap is vooral afhankelijk van de gewasdynamiek en meteorologie. De tweede stap is afhankelijk van de bodemfysische eigenschappen, de grondwaterstand en de wortelverdeling. Veel van deze onderdelen zijn goed meetbaar. Op twee locaties in De Moer (afbeelding 1, gras/kruiden plots van 3 x 8 meter) en Moergestel (mais en sorghum plots van 2,5 x 5 meter) zijn metingen verricht voor dit onderzoek. De gewasdynamiek is vastgelegd door ongeveer tweewekelijks tijdens het groeiseizoen het bladoppervlak en de vegetatiehoogte te meten (afbeelding 2). Deze gewaseigenschappen zijn lineair geïnterpoleerd om dagelijkse gewaseigenschappen te genereren (afbeelding 3). De gewasdynamiek was uiteraard sterk afhankelijk van de maaimomenten en de oogstdatums. Voor het jaar 2021 zijn bij de gras/kruiden-plots vijf maaisnedes behaald en zijn de mais en sorghum geoogst op 13 oktober 2021. Lokaal is een regenmeter geplaatst om neerslag te meten. Andere gebruikte meteorologische variabelen zijn afkomstig van het meteorologische KNMI-station Gilze-Rijen.

Het jaar 2021 had een normale hoeveelheid neerslag van 758 mm/jaar met aanzienlijke hoeveelheden in de zomermaand juli. Daardoor was het neerslagtekort relatief laag (afbeelding 4). Het jaar 2021 is gebruikt om de gewasdynamiek te meten en de potentiële verdamping uit te rekenen. Om meer meteorologische

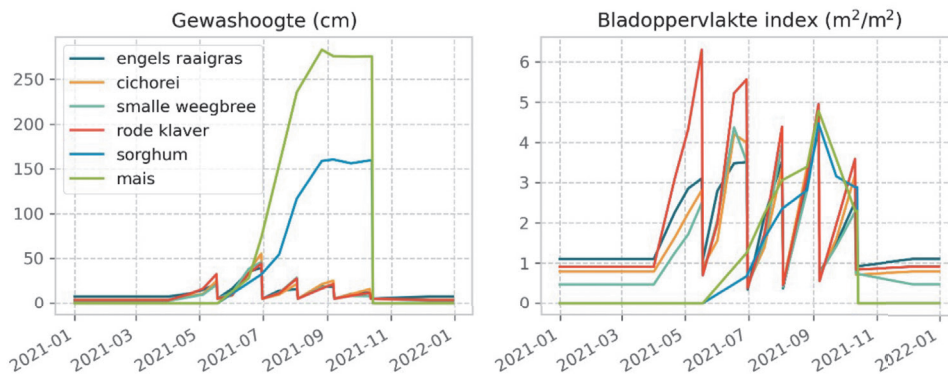
variaties mee te nemen in onze analyse hebben we met dezelfde opgelegde gewasdynamiek 30 jaar doorgerekend vanaf 1991 tot en met 2020. In dit artikel gaan we alleen in op de methode om potentiële verdamping te berekenen. In een tweede artikel zullen we deze methoden toepassen in combinatie met een hydrologisch model om de werkelijke verdamping te berekenen op basis van aanvullende veldmetingen van bodemvocht, drukhoogtes, worteldieptes en de wortelverdeling (Van Deijl e.a., in voorbereiding).



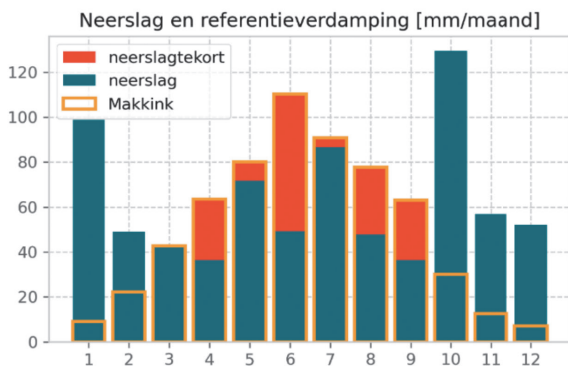
*Afbeelding 1* Veldlocatie De Moer met dataloggers, bodemvochtsensoren en tensiometers. Op de voorgrond het gewas cichorei



*Afbeelding 2* Vegetatiehoogtemetingen met behulp van een piepschuimblok (links) en bladopvlakmetingen met behulp van lichtintensiteitsmetingen (rechts)



**Afbeelding 3** Gemeten gewashoogte en bladoppervlakte index van de zes gewassen voor het jaar 2021



**Afbeelding 4** Meteorologische condities (neerslag en verdamping) per maand tijdens het jaar 2021 voor KNMI-station Gilze-Rijen. Geel is de referentiegewas-verdamping volgens Makkink (1957)

### Potentiële verdamping

Als we het hebben over potentiële verdamping, dan bedoelen we de som van interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping onder condities waarbij er geen bodemvochttekort is voor het verdampingsproces. Wel wordt in onze definitie interceptieverdamping beperkt door de beschikbaarheid van regenwater en is deze dus gelijk aan de werkelijke interceptieverdamping. Ook voor potentiële bodemverdamping verdisconteren we de verzadigingsgraad van de eerste centimeters bodem door het neerslagpatroon mee te wegen in de berekening. Daarmee maken we dus eigenlijk al een eerste schatting van de werkelijke bodemverdamping. De cijfers die we presenteren zijn dus al een aardige benadering van de werkelijke verdamping en kunnen alleen lager uitpakken als de wortelzone flink uitdroogt en planten hun huidmondjes sluiten. Daarmee kan ook de werkelijke bodemverdamping nog een fractie lager uitpakken dan de potentiële bodemverdampingscijfers die we presenteren. Potentiële bodemverdamping, potentiële transpiratie en interceptieverdamping zijn berekend met behulp van de Penman-Monteithvergelijking:

$$ET_p = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\left( \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right) \lambda \rho_w} \quad (1)$$

waarbij

- $ET_p$  : potentiële verdamping [mm/d]
- $\Delta$  : helling van de verzadigingsdampdrukcurve [kPa/K]
- $R_n$  : netto straling aan het oppervlak [ $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ]
- $G$  : bodemwarmteflux aan het oppervlak (positief bij opwarming) [ $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ]
- $\rho_a$  : de dichtheid van lucht [ $kg/m^3$ ]
- $c_p$  : de warmte capaciteit van lucht [ $MJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]
- $e_s$  : de verzadigde dampdruk [kPa]
- $e_a$  : de werkelijke dampdruk [kPa]
- $r_a$  : de aerodynamische weerstand [s/m]
- $\gamma$  : psychrometrische constante [kPa/K]
- $r_s$  : de bulk oppervlakteweerstand [s/m]
- $\lambda$  : de latente verdampingswarmte van water [MJ/kg]
- $\rho_w$  : de dichtheid van water [ $kg/m^3$ ]

Een gangbare manier om de totale verdamping te splitsen in potentiële bodemverdamping en potentiële transpiratie is om de inkomende kortgolvlige straling te verdelen tussen het deel dat op de bladeren valt en het deel dat op de bodem valt (Ritchie, 1972). Deze verhouding gebruiken wij als verdeelsleutel om de potentiële verdamping van beide oppervlakten te berekenen. Eerst wordt daarvoor de Penman-Monteithvergelijking ingevuld met eigenschappen (albedo,  $r_a$ ,  $r_s$ ) voor 100% gewas en 100% kale bodem, om vervolgens vermenigvuldigd te worden met de factor zonnestraling ontvangen op het betreffende oppervlak. De hoeveelheid zonnestraling die door een begroeiing heenvalt neemt exponentieel af met het bladoppervlak:

$$E_p = E_{p(100\%)} * e^{-k * LAI} \quad (2)$$

$$T_p = T_{p(100\%)} * (1 - e^{-k * LAI}) \quad (3)$$

Waarbij

- $E_p$  : potentiële bodemverdamping [mm/d]
- $T_p$  : potentiële transpiratie [mm/d]
- $E_{p(100\%)}$  : potentiële bodemverdamping van een volledig kale bodem [mm/d]
- $T_{p(100\%)}$  : potentiële transpiratie van een volledig begroeid oppervlak [mm/d]
- $k$  : de lichtextinctiecoëfficiënt van het betreffende gewas [-]
- $LAI$  : het bladoppervlak per  $m^2$  bodem (leaf area index) [ $m^2/m^2$ ]

Voor  $k$  hebben we een waarde gebruikt van 0,7 voor Engels raaigras, cichorei, smalle weegbree en rode klaver, gebaseerd op productiegewas (Sibma en Ennik, 1988). Voor sorghum en mais gebruikten we een waarde van 0,6, gebaseerd op mais (Sibma, 1987).

Interceptieverdamping is uitgerekend met een bakjesmodel, waarbij het bakje een maximale interceptiecapaciteit heeft per bladoppervlak. Zodra het blad nat is, wordt de oppervlakteweerstand in het Penman-Monteithmodel bijgesteld naar 0 s/m. Zolang interceptieverdamping plaatsvindt wordt de transpiratie

gepauzeerd. Omdat interceptieberekeningen gevoelig zijn voor het tijdsinterval (het meerdere keren vullen en legen per dag (Voortman e.a., 2019)), zijn de interceptieberekeningen uitgevoerd met uurlijkse waarden van de neerslag. Voor Engels raaigras, cichorei, smalle weegbree en rode klaver hebben we de interceptiecapaciteit van 0,16 mm/bladlaag gespecificeerd (Jiao e.a., 2016). Deze waarde is afgeleid van een alfafabegroeiing die vergelijkbare bladeigenschappen heeft als rode klaver. Voor mais hebben we een waarde van 0,38 mm/bladlaag gebruikt (Nazari e.a., 2020), afgeleid van een maisbegroeiing. Dit lijken lage waarden en veel decimalen, maar het is belangrijk om te realiseren dat fouten snel oplopen bij verdere afronding. Bij 180 regendagen per jaar en 0,1 mm meer interceptiecapaciteit wordt de fout al snel circa 18 mm/jaar (circa 3% van de totale verdamping).

Bij de berekening van de potentiële bodemverdamping wordt nog geen rekening gehouden met de verandering van de oppervlakteweerstand tijdens het uitdrogen van de bodem. Omdat hydrologische modellen het bodemverdampingsproces moeilijk accuraat kunnen beschrijven, reduceren we op voorhand de potentiële bodemverdamping tot een eerste schatting van de werkelijke verdamping met behulp van het model van Boesten en Stroosnijder (1986). Dit is ook een van de opties in modellen zoals SWAP (Kroes e.a., 2017). Hiermee voorkomen we dat we de bodemverdamping overschatten naarmate de bodem uitdroogt. Vervolgens kan deze eerste schatting gebruikt worden als bovenrand in een hydrologisch model.

### ***Overige modelparameters***

Bovenstaande paragrafen beschrijven de modelconcepten. De overige parameters voor het bepalen van de netto straling, aerodynamische weerstand en oppervlakteweerstand worden toegelicht in appendix 1 om het artikel verder leesbaar te houden. Voor meteorologische variabelen waarvan de berekeningen niet zijn beschreven in dit artikel hebben we gebruik gemaakt van standaardmethoden beschreven in Allen e.a. (1998).

### ***Meteorologische parameters extrapoleren naar een 'blending height'***

De methode die we presenteren heeft als doel om op een generieke wijze de potentiële verdamping te berekenen. In onze studie leunen we daarom op de meteorologische metingen van het KNMI, in dit geval van meetstation Gilze-Rijen. Deze metingen zijn uitgevoerd boven grasland. De luchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid is gemeten op 1,5 meter hoogte en de windsnelheid op 10 meter hoogte. Deze metingen zijn geldend voor het betreffende oppervlak met specifieke aerodynamische eigenschappen en vochtvoorziening. Nu ontstaat een probleem als deze metingen direct worden toegepast voor een gewas dat boven de betreffende meethoogte uitgroeit, omdat weerstanden zijn uitgedrukt ten opzichte van een punt boven het gewas. Vooral voor gewassen als mais en sorghum kan dit een probleem vormen. Om hiermee om te gaan hebben we de methode van Shuttleworth (2006) gevolgd om de windsnelheid en het dampspanningstekort te extrapoleren naar een zogenaamde 'blending height', in ons geval gedefinieerd als 50 m hoogte boven het aardoppervlak. Op deze hoogte nemen we aan dat lokale variaties in gewaseigenschappen uit-

middelen en deze condities dus ook gelden boven percelen in de buurt van het meteorologische station. De aerodynamische weerstand in vergelijking 1 wordt telkens tot deze 50 meter berekend. In de resultatensectie zullen we de effecten hiervan toelichten.

### **Potentiële verdamping limiteren door fysische grenzen**

Een ander probleem, dat meer fundamenteel van aard is, wordt gevormd doordat de Penman-Monteithbenadering de energiebalans maar deels beschouwt. Er wordt weliswaar rekening gehouden met de netto straling, maar anders dan de vergelijking wellicht doet vermoeden is er geen behoud van energie. De aerodynamische component (rechter deel van vergelijking 1) is namelijk onbegrensd en kan grote porporties aannemen als de meteorologische stations een hoog dampspanningstekort meten. In zulke gevallen kan de potentiële verdamping uit de Penman-Monteithbenadering eenvoudig twee keer zo groot worden als de nettostraling, hetgeen in Nederland niet of nauwelijks voorkomt. Deze problemen worden vaker onderkend en komen vooral voor wanneer het grasland rond meteorologische stations uitdroogt en de metingen niet meer voldoen aan het concept van potentiële verdamping (een goed van water voorzien gewas). Dit probleem wordt ook wel beschreven als het *aridity effect* (De Bruin, 2014). Dit probleem vormt een van de hoofdredenen waarom het KNMI de referentiegewasverdamping volgens Makkink publiceert (Makkink, 1957) en niet een Penman-Monteithbenadering volgt. Een belangrijke correctie die we in dit artikel presenteren, is het beperken van de potentiële verdamping door een inschatting van de maximaal beschikbare energie.

Het is wel mogelijk dat de totale verdamping hoger ligt dan de netto straling, bijvoorbeeld bij de aanvoer van warme droge lucht. In dat geval vindt een extra toevoer van energie via advection plaats. Deze advection term is ingewikkeld te kwantificeren en vergt een 3D meteorologisch model dat voor hydrologische toepassingen meestal een brug te ver is. Onder niet-advection omstandigheden kan de potentiële verdamping niet hoger worden dan de nettostraling. Dit is een goed startpunt om een bovengrens te bepalen. Voor mondiale modellen werkt het goed om te stellen dat de nettostraling ( $R_n$ ) gelijk is aan de helft van de inkomende kortgolvlige nettostraling (Kleidon en Renner, 2013):

$$R_n = 0,5 * R_{sin} * (1 - \alpha) \quad (4)$$

Waarbij

$R_{sin}$  : de inkomende kortgolvlige straling [ $W/m^2$ ]

$\alpha$  : de albedo van het oppervalk [-]

Om enige ruimte geven voor een advection post, vermenigvuldigen we deze netto straling met de Priestley-Taylorcoëfficiënt (Priestley en Taylor, 1972) van 1,26. Deze factor komt niet uit de lucht vallen, maar is een factor die voor veel oppervlakten gebruikt wordt om voor advection te corrigeren. Dus de maximale dagelijkse verdamping kan niet hoger liggen dan:

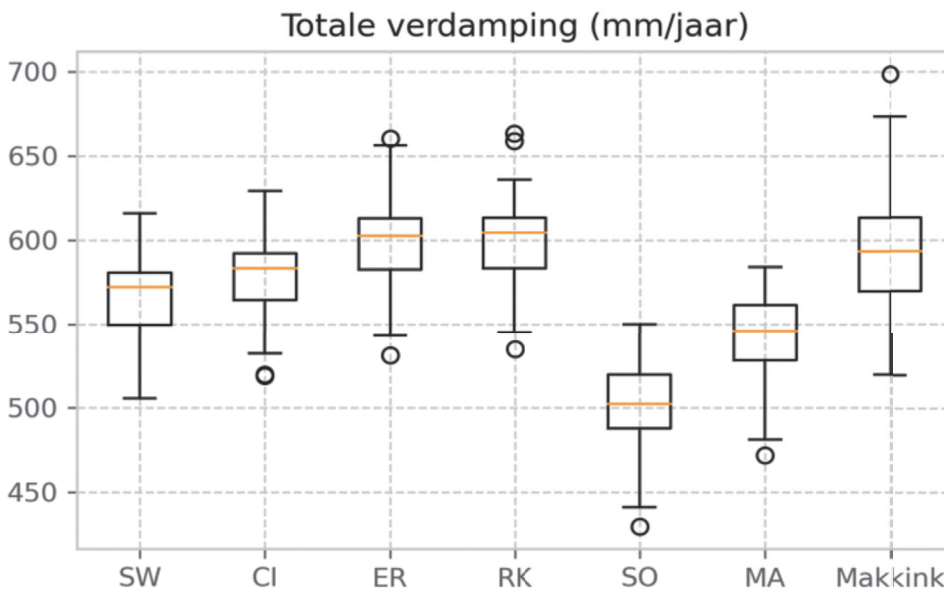
$$ET_{p \text{ limiet}} = 0,5 * R_{sin} * (1 - \alpha) * 1,26 \quad (5)$$

We hebben bewust gekozen om deze bovengrens zo eenvoudig mogelijk te definiëren op basis van de inkomende zonnestraling, zodat deze breed toepasbaar is. Een andere optie zou zijn om de voorspelde netto straling van het betreffende oppervlak te nemen (zie appendix 1), maar dit zou in de wintermaanden de verdamping te veel begrenzen doordat in de wintermaanden de netto straling negatief is of rond de 0 Watt/m<sup>2</sup> schommelt. Bovenstaande grens hebben we toegepast op de  $T_{p(100\%)}$  en  $E_{p(100\%)}$  (vergelijking 2 en 3). In het geval van interceptieverdamping hebben we deze bovengrens niet toegepast omdat interceptiewater snel kan verdampen en veel energie uit de atmosfeer kan onttrekken of zelfs energie uit een warme begroeiing kan onttrekken (Cisneros Vaca e.a., 2018). Het limiteren van interceptieverdamping is daarom onverstandig. Dit effect wordt ook gebruikt door boeren om via beregening het gewas te koelen, ter voorkoming van hittestress.

## Resultaten

### Verdampingscijfers

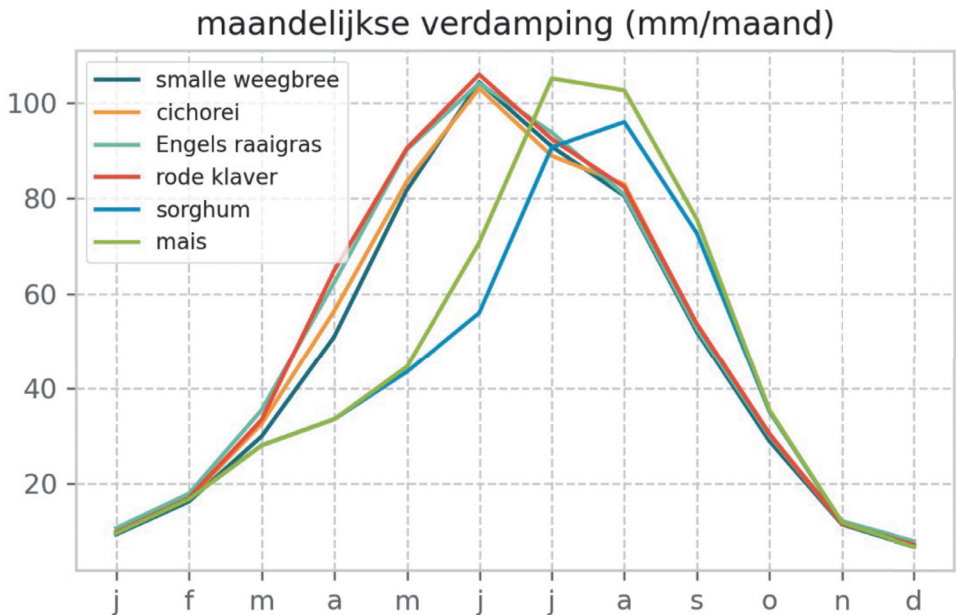
De berekende waarden voor de potentiële verdamping van de kortere gewassen in De Moer verschillen weinig onderling (afbeelding 5). Het gemiddelde van de totale verdamping gedurende de dertigjarige periode voor Engels raaigras, cichorei, smalle weegbree en rode klaver varieerde slechts 36 mm/jaar (tabel 1), ondanks toch aanzienlijke verschillen in het aantal bladlagen (circa 2 tot 3) in het begin van het seizoen (afbeelding 3). Dit komt doordat de afzonderlijke posten transpiratie en bodemverdamping elkaar kunnen opheffen en doordat bij een groot aantal bladlagen de onderste bladlagen minder effectief transpireren (zie appendix 1). De individuele verdampingsposten vertonen grotere verschillen dan het totaal (tabel 1). Zo is de variatie in transpiratie gemiddeld



**Afbeelding 5** Boxplots van de totale verdamping (mm/jaar) van een 30-jarige periode (1991-2020) met ter vergelijking de Makkink referentiegewasverdamping. SW = smalle weegbree, CI = cichorei, ER = Engels raaigras, RK = rode klaver, SO = sorghum en MA = mais



58 mm/jaar. Sorghum en mais verschillen meer van de korte gewassen. De totale verdamping ligt duidelijk lager (circa 50 tot 100 mm/jaar; afbeelding 5) en vooral de timing door het jaar heen is anders voor mais en sorghum. Door het braakliggende perceel in het begin van de lente is de verdamping laag in april, mei en juni. Later in het seizoen in juli, augustus en september is de totale verdamping aanzienlijk hoger dan bij de kortere gewassen (afbeelding 6). Doordat sorghum een beperkte gewasontwikkeling liet zien in ons experiment, ligt de totale verdamping van sorghum het laagst.



**Afbeelding 6** De maandelijke verdamping van de verschillende gewassen (mm/maand)

**Tabel 1** Gemiddelde jaarlijkse verdampingsposten van verschillende gewassen

	Totale verdamping (mm/jaar)	Interceptie verdamping (mm/jaar)	Transpiratie (mm/jaar)	Bodemverdamping (mm/jaar)
Smalle weegbree	564	50	330	183
Cichorei	577	57	351	168
Engels raaigras	599	64	385	149
Rode klaver	600	66	388	146
Sorghum	501	53	198	250
Mais	541	64	253	224

### Correcties op Penman-Monteith-berekeningen

Het effect van het extrapoleren van de meteorologische variabelen naar 50 m boven het aardoppervlak en deze 50 m gebruiken in de berekening van aerodynamische weerstand verlaagt de totale verdamping met circa 15 mm/jaar voor korte gewassen (tabel 2). Dit effect is dus relatief beperkt. Dit komt omdat de korte gewassen vergelijkbare aerodynamische eigenschappen hebben als het

grasland waarboven de meteostations zijn geplaatst en korte gewassen al een relatief grote aerodynamische weerstand hebben waardoor berekeningen minder gevoelig zijn voor windsnelheid en het dampspanningstekort. Bij hogere gewassen kunnen we de effecten alleen bepalen voor sorghum, omdat mais boven de referentiehoogten uitgroeit. Voor sorghum leidt deze meteorologische correctie tot een verlaging van de jaarlijkse verdamping van 50 mm/jaar. Dat is een stevig verschil. De redenatie hierachter is dat sorghum andere aerodynamische eigenschappen heeft dan het grasland waar de meteostations staan. Het limiteren van de verdamping met een fysische grens heeft een nog groter effect op de verdampingscijfers. De totale verdamping ligt circa 37 tot 85 mm/jaar lager als de verdamping wordt gelimiteerd door onze inschatting van de maximaal beschikbare energie (tabel 2).

**Tabel 2** Gemiddelde effecten op jaarlijkse potentiële verdampingscijfers van extrapolaties van meteorologische variabelen naar 50 m hoogte in de atmosfeer en limitatie van de beschikbare energie. Door de gewashoogte van mais kan de extrapolatie niet uitgezet worden, waardoor we daar geen getal voor kunnen invullen

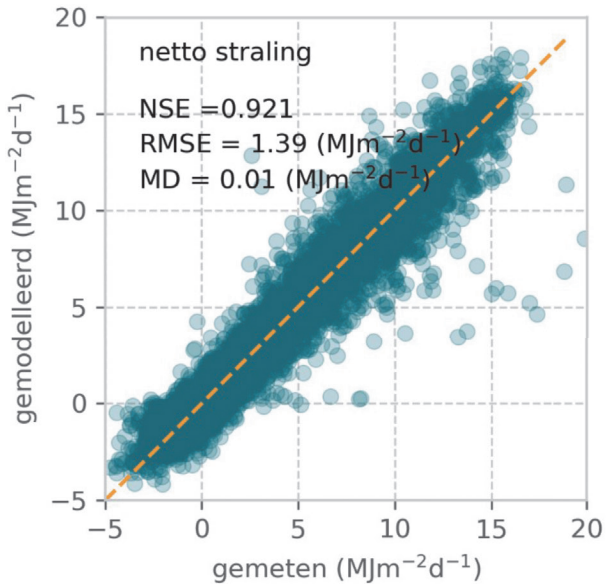
Gewas	effect extrapolatie (mm/jaar)	effect energielimiet (mm/jaar)
Smalle weegbree	15	39
Cichorei	15	38
Engels raaigras	15	37
Rode klaver	18	41
Sorghum	50	62
Mais	NA	85

## Discussie en conclusies

In dit artikel presenteren we een methode om de potentiële verdamping te kunnen schatten op basis van eenvoudige veldmetingen, gecombineerd met standaard meetgegevens van een meteorologisch KNMI-station. Omdat een brede kennisbasis bestaat over de verdamping van gewassen is het goed mogelijk om een berekening te maken op basis van veldmetingen. Directe validatie van onze aanpak is ingewikkeld, omdat we juist vanwege de kosten geen directe verdampingsmetingen konden realiseren in de meetplots uit deze studie. Daarom vergelijken we onze cijfers met die van meetstations waar in het verleden de werkelijke verdamping is gemeten.

Van grasland is bekend dat de verdamping ongeveer gelijk is aan de referentiegewas-verdamping volgens Makkink, zolang er voldoende water beschikbaar is. Er zijn ook twijfels of de verdamping van grasland niet een fractie hoger dan Makkink zou moeten liggen (Voortman e.a., 2016). Onze berekeningen van potentiële verdamping zitten dicht in de buurt van de Makkink referentiegewas-verdamping (afbeelding 5) en zijn daarmee in lijn met onze verwachtingen. Van mais zijn enkele metingen beschikbaar van de locaties Langerak en Dijkgraaf (Elbers e.a., 2009). Voor Langerak en Dijkgraaf bedroeg de totale verdamping respectievelijk 530 en 580 mm/jaar. Dit was gelijk aan 0,86 en 1,02 keer de referentie-gewasverdamping volgens Makkink. In onze studie komen we uit op

0,91 keer de Makkink referentiegewasverdamping en komen we dus in de buurt van bestaande metingen. Voor de andere gewassen zijn naar ons weten geen directe metingen voorhanden in Nederland. Het is ook nuttig om individuele energieposten te vergelijken met metingen. Daarom hebben we de berekening van de netto straling voor grasland vergeleken met de metingen te Cabauw boven grasland (data CESAR observatory). De netto straling kunnen we zeer nauwkeurig modelleren (afbeelding 7), met een gemiddelde afwijking van maar 0,01 MJ/m<sup>2</sup>/d. Omdat de bepaling van de netto straling een belangrijk startpunt is van onze berekeningen geeft dit ons vertrouwen in de gepresenteerde verdampingscijfers.



**Afbeelding 7** De relatie tussen gemeten en gemodelleerde netto straling voor Engels raaigras. In dit geval voor locatie Cabauw. NSE is de Nash-Sutcliffe efficiency, RMSE is de root mean squared error en MD is de mean difference

Van individuele verdampingsposten (interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping) zijn nauwelijks gemeten cijfers beschikbaar. De afzonderlijke posten zijn namelijk moeilijk te meten en worden meestal op basis van modellen berekend. Voor bodemverdamping zijn belangrijke ijkpunten de verdampingsmetingen zonder begroeiing zoals in de Castricummer duinen (200 mm/jaar, Stuyfzand (1993)) en Soestduinen (250 mm/jaar, Voortman e.a., 2015)). Hoewel dit zandbodems zijn, met een grovere korrelgrootteverdeling en in het geval van Castricum met een lossere bodemstructuur, mag je verwachten dat de potentiële bodemverdamping onder gewassen niet veel hoger uitkomt dan deze cijfers. Voor de korte gewassen is dit het geval. Voor sorghum en mais komen deze cijfers ongeveer overeen omdat een groot deel van de tijd de sorghum- en maispercelen braak liggen (zolang geen groenbemester wordt ingezaaid). Dit geeft aan dat de bodemverdampingcijfers ongeveer rijmen met onze verwachtingen.

Bij het ontwikkelen van onze methode om de potentiële verdamping te schatten zijn tevens de tekortkomingen bloot komen te liggen van de Penman-Monteith-benadering. Het gebruik van klimaatstations met andere gewaseigenschappen dan de percelen waarvoor we berekeningen uitvoeren hebben we gecorrigeerd door de meteorologische variabelen te extrapoleren naar 50 m hoogte, waar we mogen verwachten dat lokale variaties in aerodynamische eigenschappen uitmiddelen. Deze correctie heeft voor korte gewassen weinig effect, de potentiële verdamping wordt daardoor circa 15 mm/jaar minder. Voor hogere gewassen hebben de correcties een groter effect, een reductie van 50 mm/jaar. Deze correcties zijn niet gering en daarom belangrijk om uit te voeren, vooral voor hoge gewassen. Het is sowieso onmogelijk om berekeningen te maken als gewassen boven de referentiehoogte van de meteorologische metingen uitkomen. Een correctie op de meteorologische variabelen is daarom noodzakelijk. Het in beschouwing nemen van de energiebalans heeft een nog groter effect op de berekende verdamping. Door een bovengrens te definiëren op basis van de inkomende zonnestraling, en verdampingsberekeningen met deze grens af te toppen, werd de potentiële verdamping met circa 39 tot 85 mm/jaar gereduceerd. Met deze correcties wordt de totale verdamping stevig naar beneden bijgesteld. Het lijkt erop dat deze correcties cruciaal zijn om in Nederland realistische verdampingscijfers te generen op basis van Penman-Monteith-berekeningen. Anders maken we eenvoudig overschattingen en rijmen de modelberekeningen niet met de waarnemingen. Wij raden dan ook aan om terughoudend te zijn in het toepassen van Penman-Monteith-berekeningen in Nederland, of in ieder geval controles en correcties uit te voeren zoals in deze studie. Naast dat er simpelweg een limiet is aan de beschikbare energie is er nog een tweede plantfysiologische reden om de potentiële verdamping naar beneden bij te stellen. Uit steeds meer studies blijkt dat planten hun huidmondjes sluiten als de lucht uitdroogt en het dampspanningstekort oploopt (Devi en Reddy, 2020; Grossiord e.a., 2020). Daarmee voorkomen planten dat ze uitdrogen en wordt de transpiratie gelimiteerd. In een Penman-Monteith-model gebeurt het tegenovergestelde: bij een hoog dampspanningstekort schieten verdampingscijfers omhoog. Dat lijkt ons niet realistisch en het is in dat opzicht beter, zonder deze plantfysiologische reactie expliciet te modelleren, de hoeveelheid potentiële verdamping te begrenzen.

De cijfers uit deze studie zijn ontleend aan een experiment van een jaar waarin we de gewasontwikkeling in detail hebben geregistreerd. In het jaar 2021 ontstonden geen vochttekorten. Het is dus belangrijk te realiseren dat dit potentiële verdampingcijfers zijn. In 2022 is het experiment gecontinueerd en op dit moment onderzoeken we de verdampingscijfers in relatie tot de gewasopbrengst en het optreden van droogte.

## Dankwoord

Deze activiteit is onderdeel van samenwerkingsproject KLIMAP ('Klimaatadaptatie in de Praktijk') dat mede gefinancierd wordt door de Topsectoren Agri & Food, Watertechnologie en Water & Maritime. In deze studie zijn gegevens gebruikt van de CESAR database ([www.ruisdael-observatory.nl/cesar-database/](http://www.ruisdael-observatory.nl/cesar-database/)) voor de validatie van netto stralingsberekeningen.

## Literatuur

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes en Smith, M.** (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements; *FAO Irrigation and drainage paper 56*. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.
- Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J.B. Yrisarry, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter en R. Elliott** (2006) A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method; in: *Agricultural Water Management*, vol 81, pag 1–22. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- Boesten, J.J.T.I. en L. Stroosnijder** (1986) Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate; in: *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol 34, pag 75–90.
- Bruin, H.A.R. de** (2014) Over referentiegewasverdamping; in: *Meteorologica*, vol 1, pag 15–20.
- Carmona, F., R. Rivas en E. Kruse** (2017) Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method; in: *Theoretical and Applied Climatology*, vol 129, pag 89–95. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1761-6>
- Cisneros Vaca, C., C. van der Tol en C.P. Ghimire** (2018) The influence of long-term changes in canopy structure on rainfall interception loss: a case study in Speulderbos, the Netherlands; in: *Hydrological Earth System Sciences*, vol 22, pag 3701–3719. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3701-2018>
- Deijl, D. van, B.R. Voortman, M. van den Hout, N. Hoekstra, N. van Eekeren en G.A.P.H. van den Eertwegh** (2023); in voorbereiding) Verdamping en gewasontwikkeling onder droge omstandigheden. Modelberekeningen van de werkelijke transpiratie van een aantal landbouw-gewassen. Stromingen (2023).
- Devi, M.J. en V.R. Reddy** (2020) Stomatal closure response to soil drying at different vapor pressure deficit conditions in maize; in: *Plant Physiology and Biochemistry*, vol 154, pag 714–722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.023>
- Eertwegh, G.A.P.H. van den en H.A.R. de Bruin** (2017) Werkelijke verdamping: naar een integrale benadering vanuit hydrologisch en meteorologisch oogpunt. In: *Stromingen*, vol 30(4).
- Elbers, J.A., E.J. Moors en C.M.J. Jacobs** (2009) Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. Alterra-rapport 1920, Wageningen.
- Feddes, R.A.** (1971) Water, heat and crop growth. Proefschrift Wageningen Agricultural University.
- Fuchs, M. en C.B. Tanner** (1968) Surface Temperature Measurements of Bare Soils. *Journal of Applied Meteorology*, vol 7, pag 303–305. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0303:stmobs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0303:stmobs>2.0.co;2)
- Grossiord, C., T.N. Buckley, L.A. Cernusak, K.A. Novick, B. Poulter, R.T.W. Siegwolf, J.S. Sperry en N.G. McDowell** (2020) Plant responses to rising vapor pressure deficit; in: *New Phytologist*, vol 226, pag 1550–1566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Jiao, J., D. Su, L. Han en Y. Wang** (2016) A rainfall interception model for alfalfa canopy under simulated sprinkler irrigation; in: *Water*, vol 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120585>

- Kleidon, A. en M. Renner** (2013) Thermodynamic limits of hydrologic cycling within the Earth system: concepts, estimates and implications; in: *Hydrological Earth System Sciences*, vol 17, pag 2873–2892. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2873-2013>
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit en P.E.V. van Walsum** (2017) SWAP version 4. Wageningen Environmental Research, Rapportnummer 2780, 248 pp.
- Makkink, G.G.** (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*. 11, 277–288.
- Mehrez, M.B., O. Taconet, D. Vidal-Madjar en C. Valencogne** (1992) Estimation of stomatal resistance and canopy evaporation during the HAPEX-MOBIL-HY experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 58, pag 285–313. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90066-D](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90066-D)
- Nazari, M., S.M.M. Sadeghi, J.T. Van Stan en M.R. Chaichi** (2020) Rainfall interception and redistribution by maize farmland in central Iran; in: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol 27, 100656.
- NHV** (2015) Verdamping in de Hydrologie. NHV-Werkgroep Verdamping. *NHV-special* 8.
- Priestley, C.H.B. en R.J. Taylor** (1972) On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters; in: *Monthly Weather Review*, vol 100, pag 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)
- Ritchie, J.T.** (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover; in: *Water Resources Research*, vol 8, pag 1204–1213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- Shuttleworth, W.J.** (2006) Towards One-Step Estimation of Crop Water Requirements; in: *Transactions of the ASABE*, vol 49, pag 925–935. <https://doi.org/10.13031/2013.21738>
- Sibma, L.** (1987) Ontwikkeling en groei van maïs (*Zea mays* L.) onder Nederlandse omstandigheden; in: Gewassenreeks 1, Pudoc, Wageningen
- Sibma, L. en G.C. Ennik** (1988) Ontwikkeling en groei van produktiegras onder Nederlandse omstandigheden; in: Gewassenreeks 2, Pudoc, Wageningen.
- Stuyfzand, P.J.** (1993) Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Vrije Universiteit Amsterdam, KIWA, Nieuwegein, The Netherlands.
- 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. *Hydrological Earth System Sciences*, vol 19, pag 3787–3805. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3787-2015>
- Voortman, B.R., M.H.J. van Huijgevoort en J.P.M. Witte** (2019) Verdamping van natuurterreinen berekend met AZURE. Parametrisatie van heide op basis van lysimetermetingen en een vergelijking met literatuurcijfers. KWR Watercycle Research Institute. KWR Rapport 2019.015 47.
- Voortman, B.R., J.P.M. Witte, H. Rheenen, F.C. Bosveld, J. Elbers, F. Bolt, J. Heijkers, J. Hoogendoorn, A. Bolman, T. Spek en M. Voogt** (2016) Een nieuwe en handzame lysimeter: eerste stap naar een nationaal netwerk voor de werkelijke verdamping?; in: *Stromingen*, vol 26, pag 49–64.

## Appendix 1 Berekeningen Penman-Monteith parameters

### **Netto straling**

De netto straling is berekend met (Carmona e.a., 2017):

$$R_n = R_{s,in}(1 - \alpha) + \frac{R_{s,in}}{R_{s,0}}(\varepsilon_a - 1)\varepsilon_s\sigma T_a^4 \quad (\text{A.1})$$

Waarbij

$R_{s,in}$  : inkomende kortgolvlige straling [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]

$\alpha$  : de albedo [-]

$R_{s,0}$  : de inkomende kortgolvlige straling zonder bewolking [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]

$\varepsilon_a$  : de emissiviteit van de atmosfeer [-]

$\varepsilon_s$  : de emissiviteit van het oppervlak [-]

Voor een groen gewas hebben we een albedo van 0.23 gebruikt. Dit is gelijk aan de albedo voor grasland en de referentiegewassen. Voor kale bodem hebben we een waarde van 0.13 gebruikt. Deze is gelijk aan ongepubliceerde meting te Hupsel (KWR) en valt binnen de waardes (0.1 en 0.17) gepubliceerd door Feddes (1971). Voor de emissiviteit hebben we een waarde van 0.95 voor gewassen en 0.925 voor kale bodem gebruikt (Fuchs en Tanner, 1968).

### **Oppervlakteweerstand**

De oppervlakteweerstand  $r_s$  wordt afhankelijk van de bladoppervlakte-index berekend door de stomatale weerstand van 100 s/m te delen door de effectieve bladoppervlakte-index (Allen e.a., 2006; Mehrez e.a., 1992):

$$LAI_{\text{eff}} = \frac{LAI}{0.3 * LAI + 1.2} \quad (\text{A.2})$$

$$r_s = 100 / LAI_{\text{eff}} \quad (\text{A.3})$$

Waarbij

$LAI_{\text{eff}}$  : De effectieve LAI die wordt meegenomen in de transpiratie [-]

Voor de oppervlakteweerstand van kale bodem is een waarde van 50 s/m gebruikt. Voor nachtelijke omstandigheden wordt ook wel een waarde van 200 s/m gebruikt. Echter na een neerslagbui kan je ook een waarde van 10 s/m of zelfs 0 s/m aannemen. Deze laatste waarden komen maar een beperkt deel van de tijd voor. Daarom hebben we gekozen om een iets hogere weerstand te gebruiken die representatief is voor een vochtige, maar niet volledig verzadigde bodem.

### **De aerodynamische weerstand**

De aerodynamische weerstand is uitgerekend met:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{K^2 u_z} \quad (\text{A.4})$$

Waarbij

$r_a$  : de aerodynamische weerstand [s/m]

- $z_m$  : hoogte van de windmetingen [m]
- $z_h$  : hoogte van de relatieve luchtvochtigheidsmetingen [m]
- $d$  : het nvlvlak verplaatsingshoogte [m]
- $z_{om}$  : ruwheidslengte die de overdracht van momentum bepaalt [m]
- $z_{oh}$  : ruwheidslengte die de overdracht van warmte en waterdamp bepaalt [m]
- $K$  : de von Karmans constante 0.41 [-]
- $u_z$  : de windsnelheid op hoogte  $z_m$  [m/s]

Voor de aerodynamische eigenschappen van het gewas maken we gebruik van de volgende veel gebruikte stelregels:

$$d = 2/3 * h \tag{A.5}$$

$$z_{om} = 0.123 * h \tag{A.6}$$

$$z_{oh} = 0.1 * z_{om} \tag{A.7}$$

Waarbij

$h$  : de vegetatiehoogte [m]

Voor kale bodem hanteren we  $d = 0$ ,  $z_{om} = z_{oh} = 0.01$ .

## Summary A generic method to calculate potential evapotranspiration based on measured crop characteristics

*In this article, we present a method to calculate the potential evapotranspiration for several agricultural crops based on field measurements of crop characteristics (crop height and leaf area index). We used a model that relies on the Penman-Monteith approach to simulate potential evapotranspiration with additional corrections for the available energy and measured meteorological conditions. We measured crop characteristics and simulated the potential evapotranspiration for six different crops: English ryegrass, chicory, red clover, ribwort plantain, sorghum, and maize. The annual evapotranspiration of sorghum and maize was in the range of 501 to 541 mm/year. This is relatively low compared to other crops, due to the bare ground in winter and spring and a poor crop performance of sorghum (probably due to low air temperatures). The other crops had an average yearly evapotranspiration of 564 and 600 mm/year. The corrections for the meteorological conditions and the available energy in our modelling approach appeared to be of major importance to simulate realistic evapotranspiration numbers under Dutch meteorological conditions. Especially, the corrections for the available energy had a large effect and reduced evapotranspiration with approximately 39 to 85 mm/year. Therefore, care must be taken to apply Penman-Monteith type of models under Dutch meteorological conditions. The presented method in this article can be used in combination with a hydrological model as an alternative to directly measure evapotranspiration. The method thus fulfills a great need to generate realistic evapotranspiration figures, based on simple field measurements.*



## Auteurs

BERNARD VOORTMAN

Moisture Matters

*Bernard.voortman@moisture-matters.nl*

JOOST SLEIDERINK

Louis Bolk Instituut

*j.sleiderink@louisbolk.nl*

DION VAN DEIJL

KnowH2O

*deijl@knowh2o.nl*

NYNCKE HOEKSTRA

Louis Bolk Instituut

*n.hoekstra@louisbolk.nl*

MERIJN VAN DEN HOUT

Louis Bolk Instituut

*m.vandenhout@louisbolk.nl*

JOP VAN DER WEL

Louis Bolk Instituut / Wageningen University and Research

*jop.vanderwel@wur.nl*

NICK VAN EEKEREN

Louis Bolk Instituut

*n.vaneekeren@louisbolk.nl*

GÉ VAN DEN EERTWEGH

KnowH2O

*eertwegh@knowh2o.nl*

