
Een nieuwe en handzame lysimeter: eerste stap naar een nationaal netwerk voor de werkelijke verdamping?

**Bernard Voortman¹, Jan-Philip Witte², Hans van Rheenen³,
Fred Bosveld⁴, Jan Elbers⁵, Frank van der Bolt⁶,
Joost Heijkers⁷, Jan Hoogendoorn⁸, Almer Bolman⁹,
Teun Spek¹⁰ en Maurits Voogt¹¹**

Vrijwel overal op aarde verdampt meer dan de helft van het neerslagwater, ook in Nederland. Toch wordt deze grote verliespost in ons land slechts sporadisch gemeten. Door inspanningen van kennisinstituten, bedrijven en overheid is daarom een lysimeter ontwikkeld. Metingen in 2014 en 2015 op twee locaties vertonen opvallende verschillen, maar ook grote overeenkomsten, met eddy-correlatiemetingen. Schattingen van de verdamping via satellietdata zijn hoger dan de metingen. Tijd daarom, om metingen in het veld te combineren met modellen en waarnemingen vanuit de ruimte.

Inleiding

In de afgelopen eeuw bedachten hydrologen slimme analytische en numerieke oplossingen voor allerlei stromingsproblemen. Zwakste schakel bij de toepassing van al die oplossingen is vaak dat ze de brandstof van het grondwatersysteem nog slecht kennen. Die brandstof is natuurlijk de grondwateraanvulling: dat deel van de neerslag dat niet verdampt of over het maaiveld afstroomt naar het oppervlaktewater, maar dat uiteindelijk ten goede komt aan het grondwater. Omdat in Nederland oppervlakkige afvoer over het maaiveld vaak verwaarloosbaar of relatief klein is, zit de grootste fout doorgaans in de berekende verdampingsterm, en die fout kan aanzienlijk zijn (Zhang e.a., 2010; Moore en Heilman, 2011). Naar schatting verdampt in Nederland gemiddeld tweederde van de neerslag. Uitgaande van die fractie en van een realistische modelfout van 20% in de verdamping, dan wordt die fout twee keer zo groot,

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

2 KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, (flip.witte@kwrwater.nl)

3 Eijkelkamp Soil & Water, Giesbeek (H.vanRheenen@eijkelkamp.com)

4 KNMI, de Bilt (fred.bosveld@knmi.nl)

5 Alterra Wageningen UR, Wageningen (jan.elbers@wur.nl)

6 Alterra Wageningen UR, Wageningen (frank.vanderbolt@wur.nl)

7 STOWA, Amersfoort (heijkers.wjm@hdr.nl)

8 Vitens, Zwolle (jan.hoogendoorn@vitens.nl)

9 Waterschap Vallei en Veluwe, Apeldoorn (abolman@vallei-veluwe.nl)

10 Provincie Gelderland, Arnhem (t.spek@gelderland.nl)

11 ELeaf, Wageningen (info@eleaf.com)

dus 40%, in de berekende grondwateraanvulling. Een dergelijke fout valt niet op wanneer modellen, zoals gangbaar is, niet worden gevalideerd aan de verdamping. Op de Veluwe is een verdampingsfout van 20% groter dan alle drinkwateronttrekkingen (voor 2 miljoen mensen) aldaar bij elkaar (Gehrels, 1999; Driessen, 2007).

De verdamping varieert aanzienlijk per begroeiingstype en de mens stuurt hem, meestal onbewust, via veranderingen in het landschap. De verdamping neemt bijvoorbeeld toe als stuifzanden dichtgroeien of als boeren de gewasproductie opschroeven. Omgekeerd kan de grondwatervoorraad worden vergroot door het actief stimuleren van een vegetatie die weinig verdampt.

Betrouwbare verdampingscijfers zijn dus van belang voor hydrologische studies, of dat nu met modellen gebeurt of heel praktisch, bij het zoeken naar mogelijkheden om de grondwatervoorraad te vergroten. Met de komst van het SAT-WATER-consortium, een samenwerkingsverband tussen verschillende waterschappen, zijn de eerste stappen gezet om met behulp van satellietbeelden structureel een landelijk beeld van de werkelijke verdamping te krijgen. Tegelijkertijd is de afgelopen decennia veel geïnvesteerd in hydrologische modellen, onder andere in het nationaal hydrologische instrumentarium en het daaraan gerelateerde Meta-Swap om reken-technisch efficiënt verdamping en grondwateraanvulling te kunnen simuleren. Een structurele aanpak om de werkelijke verdamping te meten in het veld ontbreekt echter. Weliswaar levert het KNMI van 37 stations dagcijfers over de referentiegewasverdamping volgens Makkink (Makkink, 1957), maar die moeten in hydrologische modellen met correctiefactoren voor gewas, droogte en zout weer worden geschaald naar de werkelijke verdamping. Echte metingen van de werkelijke verdamping zijn tot op heden slechts sporadisch verzameld, en dan nog alleen in verschillende pilots gedurende een beperkt aantal jaren, zonder nationale meetstrategie of harmonisatie van de meetgegevens (zie voor een overzicht van deze metingen <http://www.climatexchange.nl/projects/verdamping.htm>). Alleen bij het CESAR-observatorium te Cabauw en in het Loobos te Kootwijk wordt tot op heden de verdamping structureel en langjarig gemeten in respectievelijk grasland en een bos met Grove den.

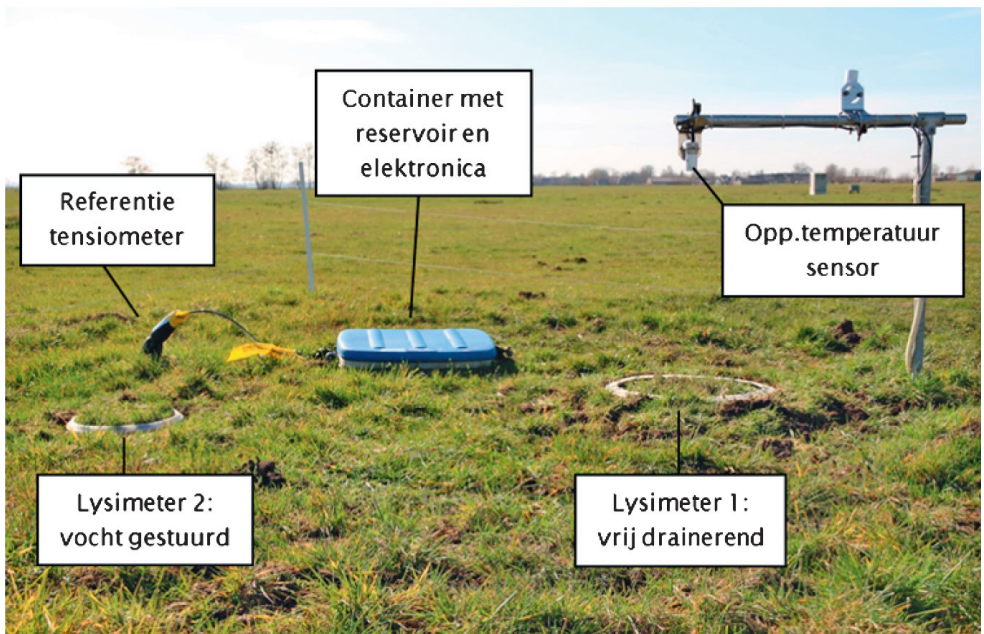
Om het schrijnend gebrek aan goede grondwaarnemingen aan te pakken heeft een breed consortium van kennisinstellingen, bedrijven en overheid (KWR, Alterra Wageningen UR, KNMI, Eijkelkamp Soil & Water, Vitens, STOWA, Waterschap Vallei en Veluwe en provincie Gelderland) de handen ineengeslagen om een lysimeter te ontwikkelen waarmee eenvoudig de werkelijke verdamping in het veld kan worden gemeten. In 2014 zijn twee prototypen geïnstalleerd in het grasland van het CESAR-observatorium te Cabauw (klei op veen met ondiepe grondwaterstanden tussen 0 en ca. 90 cm beneden maaiveld). In 2015 volgde een prototype lysimeter in een heidevegetatie in nationaal park De Hoge Veluwe (zand met zeer diepe grondwaterstanden van ca. 20 m beneden maaiveld). In dit artikel bespreken we de eerste resultaten. We vergelijken de metingen met eddy-correlatiemetingen en met schattingen van de verdamping op basis van satellietbeelden. Met deze vergelijking illustreren we de spreiding van verdampingsschattingen, en in hoeverre schaaleffecten een rol spelen bij verdampingsmetingen.

Beschrijving meetopstellingen

Op beide locaties, Cabauw en de Hoge Veluwe, verrichtten we zowel standaard meteorologische metingen (luchttemperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en neerslag)

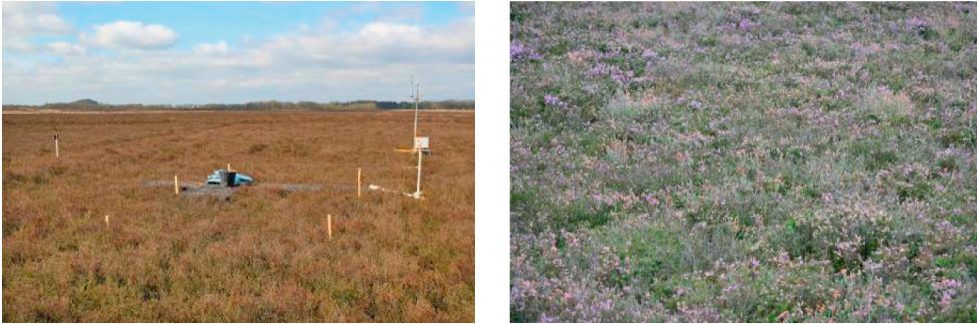
als metingen van de energiebalans (in- en uitgaande kortgolvlige en langgolvlige straling, bodemwarmteflux). Verschillen in verdamping binnen een homogene vegetatiestructuur veroorzaken verschillen in oppervlaktetemperatuur. Daarom maten we op Cabauw ook de oppervlaktetemperatuur, zowel van de lysimeter zelf (met een sensor 90 cm loodrecht daarboven) als van het perceel rondom de lysimeters (met een sensor op 200 m hoogte met een zichtveld van $\pm 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$). Op beide locaties werd tevens de verdamping met eddy-correlatiemetingen bepaald. Op Cabauw werd ook de verdamping bepaald met de energiebalans-residuummethode: netto straling – bodemwarmteflux – voelbare warmtestroom = latente warmte stroom (Beljaars en Bosveld, 1997). Deze methode werkt goed voor dagtotalen en vormt een betrouwbare lange meetreeks voor Cabauw.

Gezien de hoge grondwaterstand en het altijd groen blijven van het grasland, ook in droge zomers, gaan we a priori ervan uit dat de verdamping op locatie Cabauw vrijwel altijd gelijk is aan de potentiële verdamping. De metingen te Cabauw zijn uitgevoerd ter validatie van de resultaten van de lysimeters. Op deze locatie werden twee prototype lysimeters geïnstalleerd: één met een diameter van 30 cm en een diepte van 30 cm en één met een diameter van 50 cm en 50 cm diep (Afbeelding 1). Het gras binnen de plot van de lysimeters (binnen een afrastering van schrikdraad) werd tijdens het groeiseizoen maandelijks gemaaid (tot een grashoogte van $\pm 8 \text{ cm}$, zodoende varieerde de hoogte tussen 8 en 12 cm), om zo goed mogelijk te voldoen aan de eisen voor de meting van de referentiegewasverdamping volgens Makkink. In de omgeving van de lysimeters werd het gras begraaasd door schapen. De kleine lysimeter heeft een systeem om het vochtgehalte in de lysimeter te sturen: op basis van metingen van de drukhoogte in de omgeving op 30 cm diepte en in de bodemplaat van de lysimeter wordt vanuit een container water in of uit de lysimeter gepompt. Het reservoir in de container staat net als de lysimeter op een weegelement om de flux



Afbeelding 1: Veldinrichting van het lysimeterstation op Cabauw

van en naar de lysimeter te kunnen meten op basis van gewichtsveranderingen (capillaire nalevering of drainage). De grotere lysimeter is 'vrij drainerend', wat betekent dat water alleen onderuit de lysimeter stroomt als de atmosferische druk wordt overschreden, dus bij verzadiging van de bodem. Onder deze lysimeter zit een hangend reservoir dat, evenals de grondkolom, wordt gewogen om de drainageflux te meten. Op locatie 'Hoge Veluwe' werd in het voorjaar van 2015 een vocht-gestuurde prototype lysimeter geïnstalleerd met een diameter van 50 cm en 30 cm diep. Tijdens het voorjaar van 2015 leek de heidevegetatie nagenoeg dood (geen groen bladoppervlak) en pas laat in het seizoen (half juni) kwam de heide tot leven en werd het aandeel groen bladoppervlak groter. Begin september stond de heide in bloei (Afbbeelding 2).



Afbbeelding 2: Bemeten heidevegetatie op de Hoge Veluwe. Links zonder groen bladoppervlak op 22-4-2015, rechts in bloei op 16-9-2015.

Analyses voor dit artikel

In dit artikel beperken we ons tot gegevens die van begin maart tot eind september 2015 zijn verzameld. De oppervlaktetemperatuurmetingen van Cabauw gebruikten we om de resultaten van de vrij drainerende lysimeter op te schalen naar het hele perceel. Dat deden we met behulp van het zogenaamde 3T-algoritme (Qiu e.a., 1996a; Qiu e.a., 1996b; Qiu en Zhao, 2010), dat de energiebalans van een referentievlak (subscript r, in dit geval de lysimeter) vergelijkt met die van een oppervlak waarvoor de verdamping moet worden geschat (subscript i, in dit geval het perceel):

$$LE_i = R_{ni} - G_i - (R_{nr} - G_r - LE_r) \frac{T_{si} - T_a}{T_r - T_a} \quad 1$$

Waarbij

- LE : latente warmte stroom [$J m^{-2}s^{-1}$]
- L : latente verdampingswarmte [$J kg^{-1}$]
- E : verdamping [$kg m^{-2}s^{-1}$]
- R_n : netto straling [$J m^{-2}s^{-1}$]
- G : bodemwarmte flux [$J m^{-2}s^{-1}$]
- T_s : oppervlaktetemperatuur [K]
- T_a : luchttemperatuur [K]

De vergelijking is gebaseerd op de aanname dat de aerodynamische weerstand van het referentievlak gelijk is aan de aerodynamische weerstand van het oppervlak

waarvoor de verdamping moet worden geschat. Alle termen aan de rechterkant van vergelijking 1 zijn gemeten, op de netto straling van de lysimeter na (R_{nr}). Deze is berekend, uitgaande van eenzelfde albedo als de omgeving en eenzelfde inkomende langgolvlige straling (warmtestraling). De uitgaande langgolvlige straling berekenden wij uit de gemeten oppervlaktetemperatuur met de Stephan-Bolzmanvergelijking:

$$R_{\uparrow} = \sigma T_s^4 \quad 2$$

Waarbij

R_{\uparrow} : uitgaande langgolvlige straling [$W m^{-2}$]

σ : Stephan-Bolzmanconstante, $5.67 \cdot 10^{-8}$ [$W m^{-2} K^{-4}$]

De gemeten oppervlaktetemperatuur van zowel de lysimeter als de omgeving kan nog worden gecorrigeerd voor het feit dat een gedeelte van de gemeten langgolvlige straling niet door de begroeiing zelf wordt uitgezonden, maar gereflecteerd langgolvlige straling is. Bij een groen bladoppervlak gaat het om 2-4%. We hebben de correctie niet uitgevoerd omdat hij binnen de ruis valt van de door ons gebruikte sensoren, en omdat vergelijking (1) niet heel gevoelig is voor kleine systematische afwijkingen van T_s . In de volgende paragraaf vergelijken we de lysimeterresultaten met de eddy-correlatie metingen, de verdamping volgens de energiebalans-residuummethode (LEBAL) van Cabauw en met een schatting van de verdamping uit satellietbeelden door het ETLook algoritme (Bastiaanssen e.a., 2012). Tevens wordt de gemeten verdamping vergeleken met de referentie-gewasverdamping volgens Makkink (Makkink, 1957) en met de referentie-gewasverdamping volgens de ASCE methode die gebruik maakt van een Penman-Monteithvergelijking (ASCE-EWRI, 2005).

Het eddy-correlatiesysteem meet de verdamping op perceelschaal waarbij de footprint afhankelijk is van de windrichting en windsnelheid; met het ETLook-algoritme wordt de dagelijkse verdamping per 250 x 250 m bepaald. Reeksen van eddy-correlatiemetingen bevatten vaak hiaten, die via een wiskundige techniek (Reichstein e.a., 2005) kunnen worden opgevuld. Voor de Hoge Veluwe waren in de meetperiode van 132 dagen, 23 dagen waarvoor meer dan 50% van de waarnemingen moest worden opgevuld. Een deel van de ontbrekende data was het gevolg van een gebrek aan stroom tijdens het opzetten van de metingen.

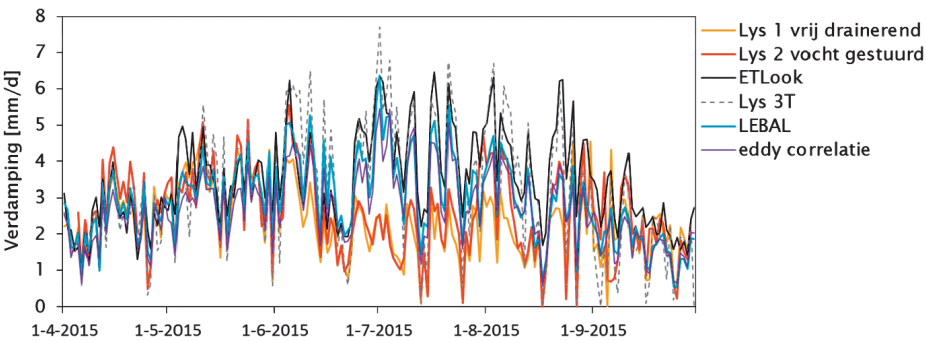
Resultaten

Verdamping op Cabauw

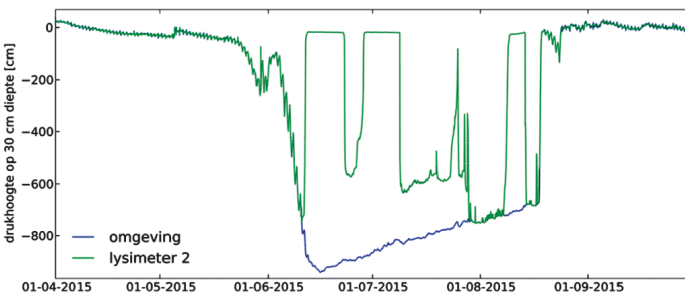
Bij voldoende vocht in de bodem vertonen alle meetmethoden een vergelijkbaar signaal, maar in de zomer van 2015 gaat de verdamping van de lysimeters beduidend achterlopen bij de rest (Afbelding 3). Doordat de zuigplaat dan niet meer functioneert, levert de vochtgestuurde lysimeter dan vergelijkbare waarden als de vrij drainerende lysimeter. Voor een goed presterende vochtgestuurde lysimeter dienen de poriën van de zuigplaat onderin de lysimeter gevuld te blijven met water, zodat daarmee een onderdruk kan worden gecreëerd. In de zomer van 2015 droogde de bodem echter zover uit, dat een kritische onderdruk (in Engels de 'bubble point' of 'air entry value') werd overschreden (Afbelding 4). Daarbij drong lucht de zuigplaat binnen waarna de vochtgestuurde lysimeter zich ging gedragen als een vrij drainerende lysimeter. Na verza-

diging van de bodem raakte de bodemplaat weer gevuld met water en herstelde het zuigstelsel.

Gedurende de zomerperiode zijn dus verschillen in verdamping tussen de lysimeters en de andere methoden te verklaren door een vochttekort. Dit vochttekort is ook zichtbaar in de oppervlaktetemperatuur die werd geregistreerd van de vrij drainerende lysimeter: gedurende de zomermaanden werd de lysimeter 2 °C tot 3,5 °C warmer dan het perceel (Afbeelding 5). De meetfout door een tekort aan water is gecorrigeerd met behulp van het 3T-algoritme waarmee een schatting van de verdamping van het gehele perceel (1,5 ha) op Cabauw wordt verkregen (Lys 3T in Afbeelding 6). De cumulatieve verdamping van de vrij drainerende lysimeter, de vochtgestuurde lysimeter en van het eddy-correlatiesysteem was op 1 juni, toen de zuigplaat nog functioneerde, respectievelijk 170 mm, 177 mm en 151 mm. De gemiddelde verdamping gemeten met de twee lysimeters was dus 15% hoger dan die van het eddy-correlatiesysteem. Over de hele meetperiode van ongeveer zes maanden bedroeg de eddy-correlatieverdamping 492 mm. De geëxtrapoleerde verdamping van de vrij drainerende lysimeter (Lys 3T) bedroeg voor deze periode 571 mm, dus ook ongeveer 15% meer (16% om precies te zijn). Verschillen tussen de lysimetermetingen en de energiebalans-residumethode (LEBAL) zijn een stuk kleiner. Voordat de zuigplaat doorsloeg was het verschil met de vrij drainerende en de vocht gestuurde lysimeter respectievelijk -1.1% en +3.6%. Over de hele meetperiode was het verschil tussen de energiebalans-residumethode en de geëxtrapoleerde lysimetermetingen 6%. De geëxtrapoleerde verdamping is via de oppervlaktetemperatuur gecorrigeerd voor het afwijkende gedrag van de lysimeter tijdens de zomer, zodat een vergelijking met

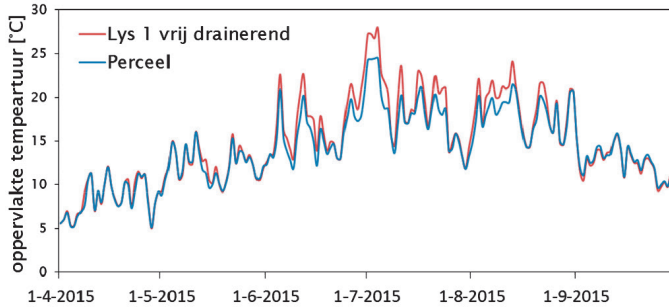


Afbeelding 3: Dagwaarden van de verdamping van de verschillende methoden te Cabauw

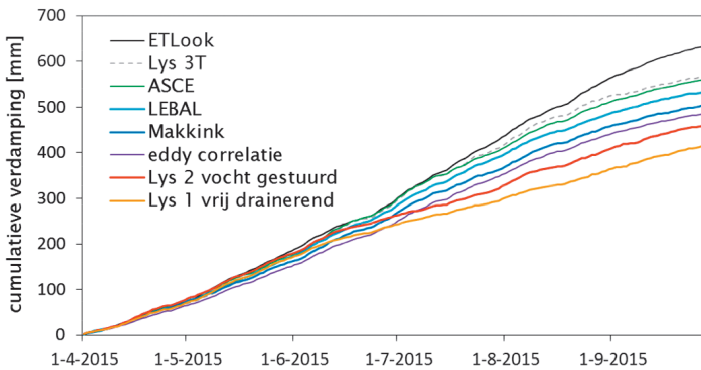


Afbeelding 4: De drukhoogte in de lysimeter en de omgeving. Gedurende de zomermaanden ontstaat er een verschil in drukhoogte tussen de lysimeter en de omgeving omdat de drukplaat in de bodem van de lysimeter doorslaat.

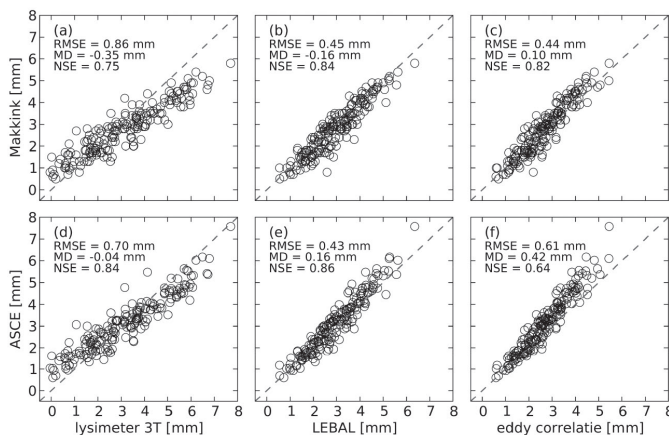
de eddy-correlatiemetingen en de energiebalans-residumethode verantwoord is. De schatting met behulp van satellietbeelden ligt 30 % hoger dan het eddy-correlatiesysteem, 19 % hoger dan de energiebalans-residumethode en 12% hoger dan de geëxtrapoleerde lysimetermetingen.



Afbeelding 5: De gemiddelde dagelijkse oppervlaktetemperatuur van de vrij drainerende lysimeter en van het perceel op Cabauw.



Afbeelding 6: Cumulatieve verdamping van de verschillende methoden, inclusief de referentie-gwasverdamping volgens Makkink en die volgens de ASCE methode.



Afbeelding 7: Geëxtrapoleerde lysimeter verdamping, energiebalans-residumethode (LEBAL) en eddy-correlatieverdamping versus de Makkink-referentie-gwasverdamping en de ASCE-referentie-gwasverdamping. RMSE: root mean squared error, MD: mean difference, NSE: Nash-Sutcliffe model efficiëncycoëfficiënt (als deze gelijk is aan 1 liggen de punten op de 1:1 lijn (stippellijn)).

Simulaties van de referentiegewasverdamping lijken sterk op de metingen (Afbeelding 6 en 7). De cumulatieve Makkink referentie-gewasverdamping over de hele meetperiode was 509 mm, wat goed overeenkomt met de eddy-correlatiemetingen (492 mm); de cumulatieve Penman-Monteith-referentiegewasverdamping volgens de ASCE-methode was 565 mm, wat sterk lijkt op de geëxtrapoleerde lysimeterverdamping (571 mm). De energiebalans-residuummethode valt met cumulatief 538 mm tussen beide berekeningen van de referentieverdamping in. De lysimeters hebben een grotere spreiding van resultaten dan de modellen (d.w.z. de modellen vlakken de verdamping af), de EC-metingen zijn daarentegen afgevlakt ten opzichte van de ASCE-berekeningen. De Makkink-reenresultaten en de EC-metingen vertonen de grootste overeenkomst (Afbeelding 7).

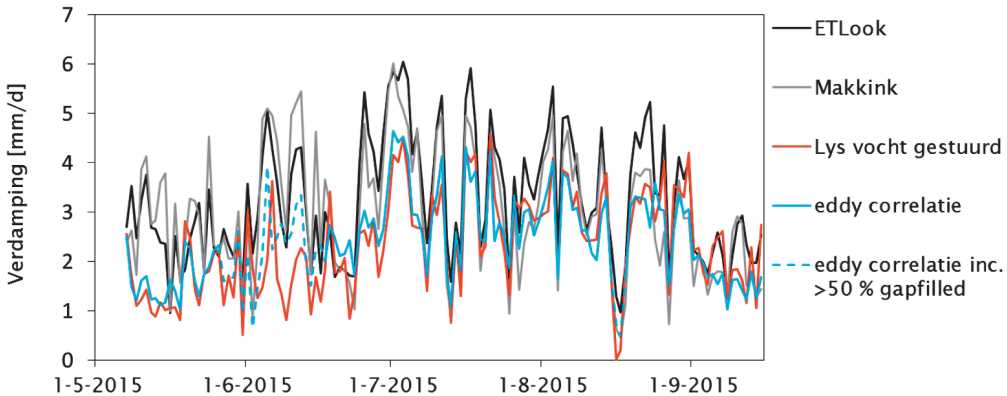
Verdamping op de Hoge Veluwe

De ontwikkeling van de vegetatie gedurende het groeiseizoen is zichtbaar in de metingen (Afbeelding 8): tijdens het voorjaar was de gemeten verdamping van heide met zowel de lysimeter als het eddy-correlatiesysteem ongeveer 60 % van de Makkink-referentiegewasverdamping; vanaf augustus was de verdamping van heide daaraan ongeveer gelijk.

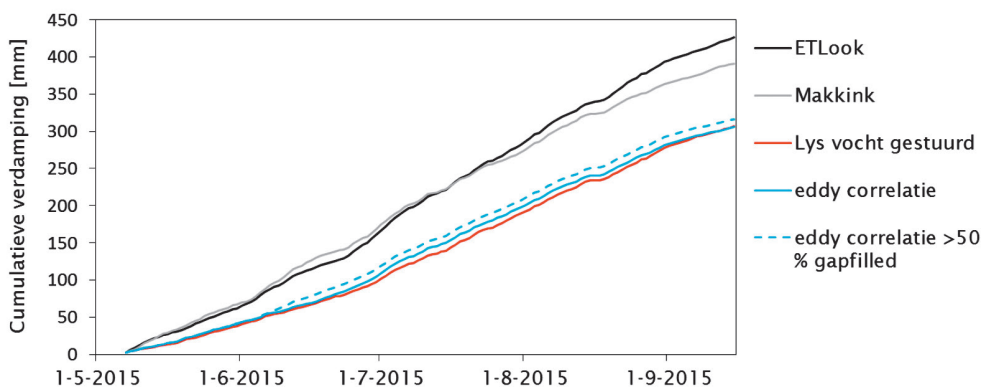
Terwijl op Cabauw met zijn ondiepe grondwaterstand de drukplaat in de vochtgestuurde lysimeter doorsloeg, bleef de drukplaat in de lysimeter op de grondwateronafhankelijke Hoge Veluwe de hele tijd goed functioneren.

De gemeten verdamping met het eddy-correlatiesysteem en met de lysimeter is nagenoeg hetzelfde (RMSE: 0.43 mm, MD: -0.01, NSE: 0.8). De cumulatieve eddy-correlatieverdamping over de hele meetperiode, inclusief de 23 dagen met meer dan 50 % hiaatopvulling, wijkt slechts 10 mm af van de lysimeterverdamping (Afbeelding 9). Via hiaatopvulling verkregen waarden kunnen behoorlijk afwijken van de lysimetermetingen, zoals Afbeelding 8 voor de eerste helft van juni 2015 laat zien. Als daarom metingen op dagen met meer dan 50% hiaatopvulling worden vervangen door waarden van de lysimeter, is de cumulatieve verdamping van beide methoden zelfs identiek (Afbeelding 9).

De verdamping geschat met het ETLook algoritme ligt 120 mm (39 %) hoger dan de meting met de lysimeter (en dus ook met de eddy-correlatiemeting).



Afbeelding 8: Dagwaarden van de verdamping van de verschillende methoden op de Hoge Veluwe, inclusief de Makkink-verdamping van KNMI-klimaatstation Deelen.



Afbeelding 9: Cumulatieve verdamping van de verschillende methoden op de Hoge Veluwe.

Discussie

Werking van de zuigplaat

Terwijl op Cabauw met zijn ondiepe grondwaterstand de drukplaat in de vochtgestuurde lysimeter doorslaat, bleef de drukplaat in de lysimeter op de grondwateronafhankelijke Hoge Veluwe goed presteren. Het doorslaan van de drukplaat op Cabauw heeft alles te maken met de ongunstige pF-curve van de zware kleibodem, waardoor vochtverlies door verdamping gepaard gaat met een extreme daling van de drukhoogte. Dat desondanks de verdamping potentieel blijft, heeft te maken met de diepe doorworteling van grasland op kleigrond. Dus ondanks dat Cabauw natter is dan de Veluwe neemt de drukhoogte in de bodem op 30 cm diepte zomers meer af dan op de Veluwe (op Cabauw daalde de drukhoogte tot -800 cm, op de Veluwe tot -140 cm). De kans dat de drukplaat in de lysimeter doorslaat hangt mede af van de diepte van de lysimeter omdat met toenemende diepte beneden maaiveld de bodem 's zomers minder ver uitdroogt. Het prototype op Cabauw was relatief ondiep (30 cm). Op basis van ervaring met de prototypen is een versie voor de markt ontwikkeld met een diepte van 50 cm, en dus met een lagere kans op het doorslaan van de drukplaat in zware klei.

Vergelijking lysimetermetingen met eddy-correlatiemetingen

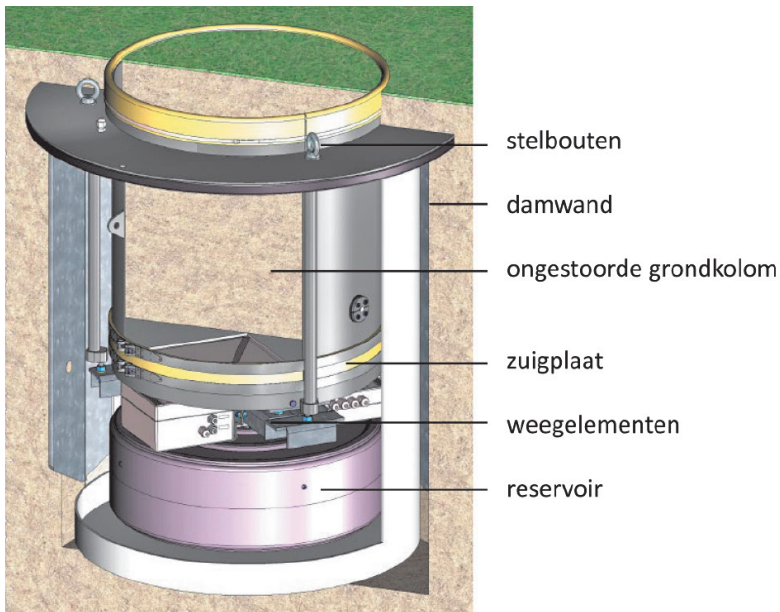
Op Cabauw is de spreiding in de geëxtrapoleerde lysimetermetingen groter dan die van de eddy-correlatiemetingen, resulterend in een grotere RMSE bij een vergelijking met simulaties van de referentiegewasverdamping (Afbeelding 7). Een verklaring is dat bij de extrapolatie via het warmtebeeld niet kan worden gecompenseerd voor verschillen in vegetatiestructuur, terwijl de eddy-correlatiemethode hier impliciet ook rekening mee houdt. De achterliggende aanname van het 3T-algoritme is immers dat de aerodynamische weerstand gelijk is voor de lysimeter en het perceel, wat impliceert dat de vegetatiebedekking en de vegetatiehoogte vergelijkbaar moeten zijn. Dat is niet altijd het geval, omdat het gras op de meetlocaties vanwege gestelde eisen door de beheerder wordt gemaaid terwijl in de rest van het perceel schapen het gras kort houden. De systematische afwijking van gemiddeld 15 % op Cabauw tussen de geëxtrapoleerde lysimetermetingen en de metingen met het eddy-correlatiesysteem valt binnen de foutenmarge die Allen e.a. (2011) noemt: lysimeter 5%, eddy-correlatie 10 tot 15 %.

Deze foutenschatting is gebaseerd op "expert judgement" van de auteurs. Voor de perioden waarvoor de temperatuur van de lysimeter overeenkomt met die van het perceel, zouden de meetresultaten vergelijkbaar moeten zijn. Dat betekent dat voor die periode de lysimeters meer verdampen dan het perceel of de eddy-correlatiemetingen de verdamping onderschatten. Onderschattingen van de verdamping met eddy-correlatiesystemen komen regelmatig voor en zijn uitvoerig gedocumenteerd (Twine e.a., 2000; Wilson e.a., 2002; Foken, 2008). De geëxtrapoleerde lysimetermetingen komen veel beter met de energiebalans-residumethode overeen: het verschil van 6% ligt binnen de meetfout. Dit is een sterke aanwijzing dat het eddy-correlatiesysteem voor de meetlocatie Cabauw in 2015 de verdamping onderschat. De Makkinkverdamping ligt 5% lager dan de energiebalans-residumethode en 11% lager dan de geëxtrapoleerde lysimetermetingen. Dit zou kunnen betekenen dat de Makkinkverdamping de potentiële verdamping voor grasland onderschat. We baseren dit vermoeden echter op één meetlocatie en gegevens van enkele maanden, waardoor we geen harde conclusies durven trekken. Gezien het grote areaal grasland in Nederland is het aan te bevelen om op meerdere locaties in grasland lysimetermetingen in combinatie met eddy-correlatiemetingen te starten. Het feit dat de Makkinkverdamping lager ligt dan de metingen bevestigt dat er geen droogtestress optreedt gedurende de meetperiode. Gezien het voorgaande is het opmerkelijk dat op de Hoge Veluwe de metingen van de onderzochte lysimeter vrijwel volledig overeenkomen met die van de eddy-correlatiemetingen. Dit is des te opmerkelijker daar de vegetatiestructuur op de Hoge Veluwe veel heterogener is dan te Cabauw, door variaties in ondergroei (mos of strooisellaag) en door de struikachtige begroeiing. Eenzelfde bevinding vonden we ook met modelberekeningen voor het duingebied Meijendel, waarbij variaties in vegetatiebedekking binnen een vegetatietype wel tot uiting kwamen in de verdeling tussen transpiratie en bodemverdamping, maar nauwelijks in de totale verdamping (som van bodemverdamping, interceptie en transpiratie) (Voortman, in voorbereiding). Een lagere transpiratie wordt namelijk merendeels gecompenseerd door een hogere bodemverdamping en andersom. Variaties in vegetatiebedekking kunnen dus toch een kleinere rol spelen dan gedacht bij de bepaling van de totale verdamping waardoor metingen op perceelschaal (eddy-correlatie) overeenkomen met die op 'puntniveau' (lysimeter). In deze studie hebben we ons beperkt tot de gegevens van één prototype lysimeter. Recent zijn vijf eindversies bij het meetstation geplaatst om nader te onderzoeken in hoeverre de heterogene begroeiing effect heeft op de verdamping.

Beoordeling verdamping uit ETLook

Het ETLook-algoritme geeft voor beide meetlocaties hogere absolute schattingen van de verdamping dan de metingen. Voor Cabauw bedraagt de cumulatieve afwijking met de eddy-correlatiemetingen 30% en met de geëxtrapoleerde lysimetermetingen 12%. Een vergelijkbaar verschil van 18% tussen ETLook en eddy-correlatie metingen zijn eerder geconstateerd voor locatie Cabauw voor het jaar 2006 (Caljé e.a., 2014). Voor het jaar 2011 waren discrepanties aanzienlijk kleiner en was een onderschatting van 4% geconstateerd (Heijkers, persoonlijke mededeling). De richting en uitslag van het signaal, zichtbaar in afbeelding 3, komen goed overeen met beide veldmetingen. Dergelijke patroonherkenning is van essentieel belang voor tijdreeksmodellen, waarvoor absolute getallen minder belangrijk zijn. Net als bij het gebruik van regenradar in plaats van puntmetingen van de neerslag (Ottow e.a., 2015) kunnen de prestaties van tijdreeksmodellen aanzienlijk worden verhoogd zodra locatiespecifieke schattingen van de verdamp-

ping worden gebruikt in plaats van de hypothetische Makkink-referentiegewasverdam-
ping die geen rekening houdt met de lokale toestand van de bodem en het gewas.
Volgens het ETLook-algoritme verdampt de droogteresistente heidevegetatie op de
Hoge Veluwe meer dan een Makkink-grasland, en de resultaten van dit algoritme voor
deze locatie classificeren we dan ook als onrealistisch. De afwijkingen met beide veld-
methoden bedraagt over de meetperioden maar liefst 39%, maar waardoor kan dat
zijn ontstaan? Het ETLook-algoritme is gestoeld op modelberekeningen uitgevoerd
met een Penman-Monteith-vergelijking, gebruikmakend van een bepaling van het
groen bladoppervlak met satellietbeelden, een schatting van het bodemvochtgehalte
in de toplaag en de wortelzone met radarbeelden, meteorologische gegevens van
klimaatstations en kaarten van het landgebruik (Bastiaanssen e.a., 2012). Deze bere-
kening gebruikt empirische vergelijkingen en vegetatieparameters die voornamelijk
voortkomen uit de agrohydrologie. Wij betwijfelen of deze regels mogen worden toe-
gepast op natuurlijke vegetaties zoals heidevegetaties (die groen ogen door mossige
ondergroei in situaties met weinig groen bladoppervlak). Daarnaast wordt in de bepa-
ling van de verdamping met ETLook gebruik gemaakt van een schatting van de netto
langgolvlige straling volgens de FAO-56-methode (Allen e.a., 1998). De netto lang-
golvlige straling is een van de grootste energieflexen (in uitgaande richting) in droge
natuurlijke vegetaties door de relatief lage verdamping en hoge oppervlaktetemperatuur
(voor heide 32% van de totale energiebalans). Het FAO-56-model presteert slecht
voor dergelijke vegetaties (Voortman e.a., 2015). Gelukkig laat het ETLook-algoritme
het toe om veldmetingen te gebruiken om specifieke vegetaties beter te parametriseren.
Voor de heide op het meetstation op de Veluwe is verdere kalibratie gewenst om
de verdamping met ETLook accurater te kunnen schatten.



Afbeelding 10: Tekening van het definitieve lysimeterontwerp. De lysimeter rust op een damwand-constructie en kan waterpas gesteld worden met stelbouten. De ongestoorde grondkolom staat op een weegelement. Het reservoir hangt aan een weegelement. Met de zuigplaat kan het vochtgehalte in de grondkolom worden gestuurd.



Afbeelding 11: a) damwandconstructie en steekring aan het begin van de installatie, b) pers voor het steken van een ongestoorde grondkolom, c) hijsinrichting om de lysimeter op te takelen en af te monteren, d) lysimeter na installatie.

De noodzaak om modellen en remote sensing te combineren met metingen

De spreiding tussen de verschillende metingen en modellen is aanzienlijk en bevestigt de grote onzekerheden in simulaties van de verdamping, en daarmee grote onzekerheden in de uitkomsten van hydrologische modellen. De hydrologische gemeenschap zou veel baat hebben bij een netwerk van verdampingsmetingen om remote-sensingalgoritmen en hydrologische modellen te parametriseren, te valideren en/of te kalibreren. Daarnaast kan een dergelijk netwerk operationele weermodellen van het KNMI ondersteunen. Een netwerk van verdampingsmetingen kan niet losstaan van remote sensing en hydrologische modellen omdat het kostentechnisch onhaalbaar is om met een hoge dichtheid alle vegetaties en bodems in Nederland te bemeten. Een ruimtelijk beeld van de verdamping zal daarom altijd het resultaat zijn van een combinatie van remote sensing, modellen en metingen aan de grond. De kosten van een landelijk netwerk vallen in het niet bij de investeringen in grondwatermodellen van afgelopen jaren. Het eindontwerp van de lysimeter (Afbeelding 10 en 11), dat is gebaseerd op de ervaringen bij Cabauw, de Hoge Veluwe en een eerder project bij Soestduinen (Voortman e.a., 2015), wordt door Eijkelkamp Soil & Water voor $\pm 12,5$ duizend euro aangeboden.

Conclusies en aanbevelingen

In deze studie kwamen de eddy-correlatiemetingen in de heide op de Hoge Veluwe

overeen met de metingen door onze lysimeter. Op het grasland van Cabauw bedroeg het cumulatieve verschil echter 15%, wat aanzienlijk is en gelijk aan het verschil tussen de Makkink-referentie-gewasverdamping en de ASCE-referentie-gewasverdamping (gebruikmakend van een Penman-Monteith-vergelijking). Om uit te kunnen maken welke modelbenadering de potentiële verdamping van grasland het beste benadert, Makkink of Penman-Monteith, raden we aan om op meerdere plekken in grasland eddy-correlatiemetingen en lysimetermetingen te combineren. Door meer replica's te gebruiken kan bovendien worden onderzocht of afwijkingen tussen beide meetmethoden systematisch of willekeurig zijn. Door aanvullend de netto straling en bodemwarmteflux te meten, kan de robuuste energiebalans-residuummethode ook toegepast worden. Uit onze studie concluderen we dat patronen in ETLook-berekeningen voor gewassen, zoals grasland, overeenkomen met de metingen. Kalibratie van het ETLook-algoritme is gewenst voor natuurlijke vegetaties, zoals heide. Hetzelfde geldt natuurlijk voor de parametrisering van de vegetatie in hydrologische modellen, zoals het NHI. Onze metingen en modelsimulaties lieten een grote spreiding zien en bevestigden de grote onzekerheden in simulaties van de verdamping. Om tot een accuraat landelijk beeld van de werkelijke verdamping te komen pleiten we daarom voor een nationaal netwerk van veldmetingen. Een dergelijk netwerk dient ter verbetering van remote-sensingalgoritmen, hydrologische modellen en weermodellen. Deze algoritmen en modellen zijn nodig om veldmetingen ruimtelijk te extrapoleren en om tot betere verwachtingen te komen. Modellen, remote-sensingalgoritmen en metingen aan de grond dienen dus te worden gecombineerd om tot een optimale vlakdekkende schatting van de werkelijke verdamping, inclusief de nauwkeurigheid, te komen. Deze aanbeveling is in lijn met de hoofdaanbeveling van de NHV-werkgroep Verdamping (NHV-werkgroep Verdamping, 2015). In Nederland wordt de neerslag op 325 stations gemeten; nu wordt het de hoogste tijd om de grootste verliespost van de waterbalans te gaan meten: de werkelijke verdamping. Dat is noodzakelijk om de waterhuishouding van Nederland optimaal te kunnen inrichten en voorbereid te zijn op grote veranderingen in het watersysteem, zoals ten gevolge van klimaatverandering.

Dankwoord

Deze activiteit is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken vanuit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's), Eijkelpark Soil & Water, Nederlandse drinkwaterbedrijven via het bedrijfstakonderzoek (BTO), de provincie Gelderland, Alterra Wageningen UR, STOWA, Waterschap Vallei en Veluwe en het KNMI. Wij danken het nationale park "De Hoge Veluwe" en het KNMI voor hun medewerking bij het realiseren van de lysimeter stations op respectievelijk de Veluwe en bij het CESAR observatorium te Cabauw.

Literatuur

Allen, R.G., L.S. Pereira, T.A. Howell en M.E. Jensen (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy; in: *Agricultural Water Management*, vol 98, no 6, pag 899-920.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes en M. Smith (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and drainage paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome.

ASCE-EWRI (2005) The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration.

Bastiaanssen, W.G.M., M.J.M. Cheema, W.W. Immerzeel, I.J. Miltenburg en H. Pelgrum (2012) Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model; in: *Water Resources Research*, vol 48, no 11, pag.

Beljaars, A.C.M. en F.C. Bosveld (1997) Cabauw data for the validation of land surface parameterization schemes; in: *J. of Climate*, vol 10, pag 1172-1193.

Caljé, R., F. Schaars en J. Heijkers (2014) Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping; in: *STOWA rapport 2014-18*, vol, pag.

Driessen, J.H.A. (2007) De Veluwe als bron van veilig drinkwater; in: *De Wijerd*, vol no 4, pag 85-93.

Foken, T. (2008) The energy balance closure problem: an overview; in: *Ecological Applications*, vol 18, no 6, pag 1351-1367.

Gehrels, H. (1999) Groundwater level fluctuations, Separation of natural from anthropogenic influences and determination of groundwater recharge in the Veluwe area, The Netherlands. PhD, Free University of Amsterdam, Amsterdam.

Makkink, G.G. (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters; in: *J. Inst. Wat. Engrs.*, vol 11, pag 277-288.

Moore, G.W. en J.L. Heilman (2011) Proposed principles governing how vegetation changes affect transpiration; in: *Ecohydrology*, vol 4, no 3, pag 351-358.

NHV-werkgroep Verdamping (2015) Verdamping in de hydrologie; in: *NHV-Special 8, 2015*, vol, pag.

Ottow, B.P., H. Schuurmans en T. van Steijen (2015) Meerwaarde van ruimtelijke neerslagdata voor het modelleren van stijghoogtefluctuaties; in: *Stromingen*, vol 24, no 4, pag 43-52.

Qiu, G.Y., K. Momii en T. Yano (1996a) Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature I Theoretical consideration and field verification; in: *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, vol 64, no 3, pag 401-410.

Qiu, G.Y., T. Yano en K. Momii (1996b) Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature II Application of imitation leaf temperature for detection of crop water stress; in: *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, vol 64, no 5, pag 767-773.

Qiu, G.Y. en M. Zhao (2010) Remotely monitoring evaporation rate and soil water status using thermal imaging and "three-temperatures model (3T model)" under field-scale conditions; in: *Journal of Environmental Monitoring*, vol 12, no 3, pag 716-723.

Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J.-M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir en R. Valentini (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm; in: *Global Change Biology*, vol 11, no 9, pag 1424-1439.

Twine, T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks en M.L. Wesely (2000) Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland; in: *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 103, no 3, pag 279-300.

Voortman, B.R. (in voorbereiding) How the evaporation of dune grasslands evolves during succession by the competition for water between vascular plants and mosses.

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; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol 19, no 9, pag 3787-3805.

Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom, B.E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini en S. Verma (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites; in: *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 113, no 1-4, pag 223-243.

Zhang, K., J.S. Kimball, R.R. Nemani en S.W. Running (2010) A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006; in: *Water Resources Research*, vol 46, no 9, pag.

