Verdamping

Verdamping (evapotranspiratie) is een van de belangrijkste componenten van de waterbalans in het Nederlandse waterbeheer en speelt daarnaast een centrale rol in de energiebalans van het aardoppervlak. Door de wisselwerking met de atmosferische grenslaag en processen zoals wolkenvorming speelt verdamping een belangrijke rol in het weer, het klimaat en de hydrologische kringloop. Tegelijk behoort verdamping tot een van de moeilijkste te bepalen componenten van de waterbalans om te bepalen zowel via metingen als met modellen. De nauwkeurigheid van deze schattingen heeft een directe impact op hoe goed er gestuurd kan worden op de waterverdeling in het operationele waterbeheer als voor beleidsdoeleinden zoals waterverdeling, droogtebeheer, klimaatadaptatie en klimaatverandering.

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. VERDAMPING EN VERDAMPINGSBEREKENINGEN VOOR PRAKTISCHE TOEPASSING
4. METEN EN SATELLIETGEBRUIK
5. BESCHIKBARE DATASETS
6. TOEPASSING IN MODELLEN
7. PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK
8. KOSTEN EN BATEN
9. GOVERNANCE
10. KENNISLEEMTES

1. Inleiding

Deze Deltafact behandelt de vragen welke verdampingsinformatie bruikbaar is voor Nederlands waterbeheer, wanneer volstaat referentieverdamping, wanneer is actuele verdamping nodig en welke onzekerheden zijn daarbij bepalend?

2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts

Onderwerpen: Actuele verdamping, referentie verdamping, satellietgebruik, in-situ-waarnemingen, klimaatverandering, hydrologische modellen, operationeel waterbeheer, transpiratie

Deltafacts: Zoetwatervoorziening, Effecten klimaatverandering op landbouw, Effecten klimaatverandering terrestrische natuur, Dynamische peilbeheer, Bodemvocht gestuurd beregenen, Droogte stuurt functies, Hitte en droogte in de stad.

3. Verdamping en verdampingsberekeningen voor praktische toepassing

Verdamping als proces of als grootheid

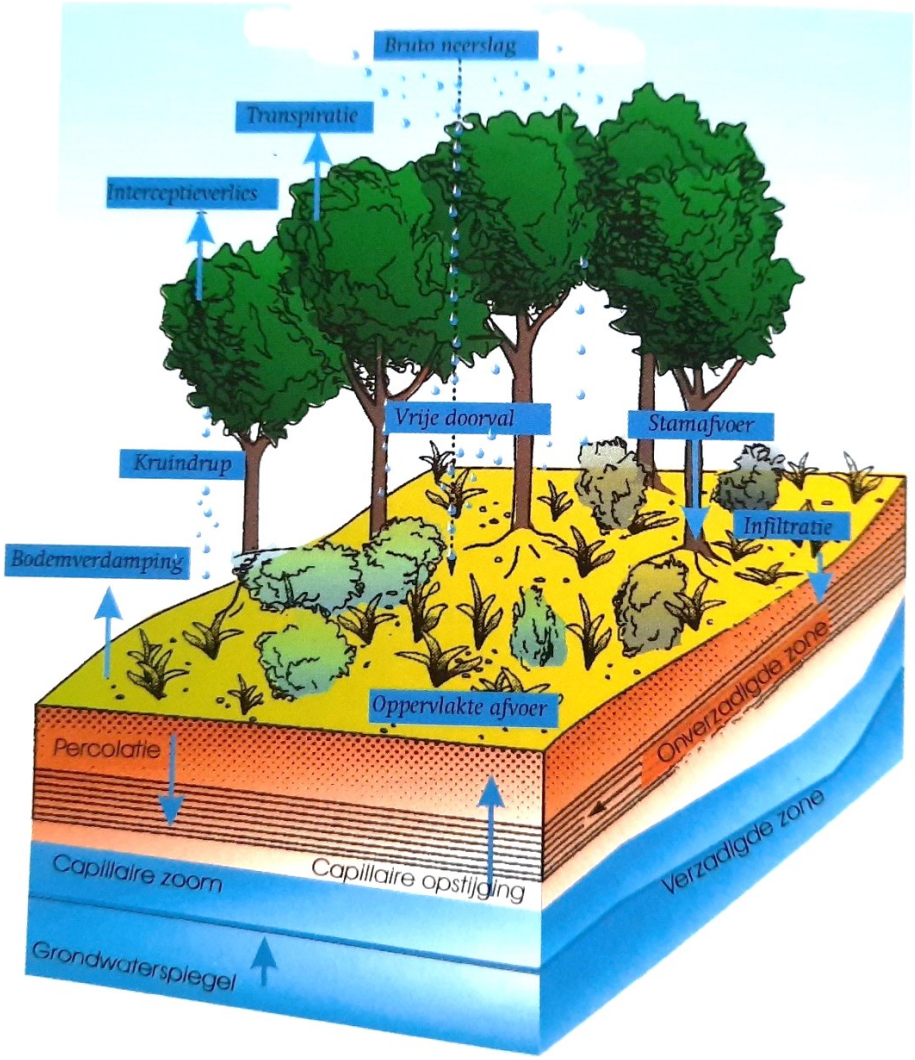
Verdamping, gezien als proces, is de overgang van een stof van de vloeibare fase naar gasfase. In de context van deze Deltafact hebben we het meestal over verdamping als grootheid of flux, namelijk "de (totale) verdamping vanaf een al of niet begroeid oppervlak per tijdseenheid" (Moors et al., 2002). In de hydrologie wordt hierbij vaak onderscheid gemaakt tussen evaporatie (verdamping vanaf bodem, open water en natte oppervlakken) en transpiratie (waterverlies via planten); gezamenlijk worden deze processen aangeduid als evapotranspiratie. Verdamping staat ook wel bekend als "evaporatie". Het omgekeerde van verdamping is condensatie en wordt in deze context vaak aangeduid als dauwvorming of dauwval.

Totale verdamping en componenten

De totale verdamping vanaf een stuk *landoppervlak (gedeeltelijk) bedekt door vegetatie*, bestaat uit verschillende componenten (Figuur 1). Het onderscheid tussen de componenten is terug te voeren op de herkomst van het verdampende water en de route die het aflegt naar de atmosfeer. De *totale verdamping* bij het boven genoemde type oppervlak is opgebouwd uit (Moors et al., 2002):

- *Transpiratie* is het deel van de totale verdamping dat vanuit de bodem via de huidmondjes en voor een klein deel ook via de cuticula (waslaag van bladeren) van planten in de atmosfeer komt.

- *Interceptieverdamping* is het deel van de verdamping dat terug te voeren is op neerslag die door vegetatie onderschept en vervolgens direct van daaruit verdampt is.
- *Bodemverdamping*, de verdamping van vloeibaar water direct vanuit de bodem; dit is de enige bron van verdamping in het geval van een kale bodem.



Figuur 1 Waterbalanstermen van een begroeid oppervlak (bron: NHV, 2015). De totale verdamping bestaat uit "bodemverdamping", "interceptieverdamping" en "transpiratie".

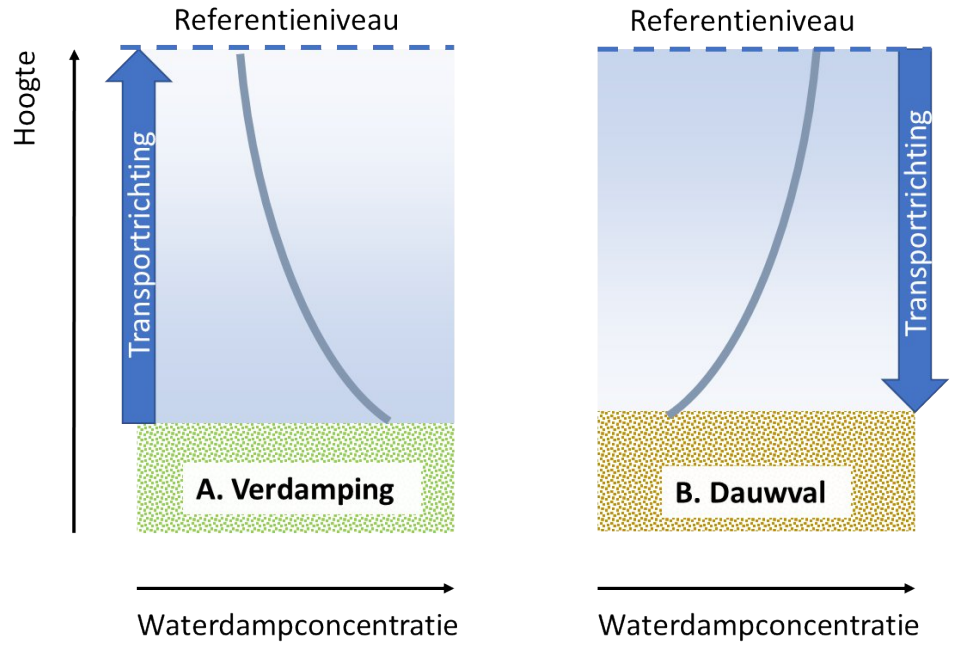
Ook in stedelijk gebied is het onderscheid tussen verschillende verdampingscomponenten relevant hoewel de onderlinge verhoudingen anders zullen zijn van die in landelijk gebied. In stedelijke gebieden is een groot deel van de interceptieverdamping terug te voeren op neerslag die door verharde oppervlakken zoals daken en straten is afgevangen en niet meteen wordt afgevoerd. Daarnaast is er een antropogene component: menselijke activiteiten, zoals industriële productie, verkeer, verwarming van gebouwen en zelfs ademhaling, dragen merkbaar bij aan het transport van waterdamp vanuit bebouwd gebied naar de atmosfeer (Oke et al., 2017). Ook als het gaat om klimaatadaptieve

voorzieningen, zoals (blauw)groendaken, groene gevels, wadi's, waterbergende groeiplaatsen voor bomen, infiltratievoorzieningen en irrigatie kunnen een substantiële bijdrage leveren aan de totale verdamping.

Bij *open water* is het wateroppervlak zelf de dominante bron van verdamping. Daarom wordt dan ook doorgaans gesproken over "de verdamping" of de "evaporatie" (van open water). Moors et al. (2002) onderscheiden daarnaast "openwaterverdamping" als een theoretische verdamping van open water (zie hierna). Aan de randen, waar open water over gaat in land, kan sprake zijn van een bijdrage van transpiratie en interceptieverdamping, zoals in rietkragen.

Drijvende kracht achter verdamping

Vlakbij het aardoppervlak wordt de verdamping bepaald door verschillen in waterdampconcentratie (absolute hoeveelheid vocht) tussen het oppervlak en de bovenliggende atmosfeer. Dit concentratieverschil bepaalt de richting van het transport van waterdamp (Figuur 2).



Figuur 2. Concentratieverschillen zijn de drijvende kracht achter transport en bepalen de richting ervan. Waterdampconcentratie is de absolute hoeveelheid vocht in de lucht. Deze neemt af met de hoogte in A, en toe in B. De gemiddelde transportrichting is dan omhoog in A en omlaag in B. Overdag kan opwarming van het aardoppervlak leiden tot een verticale gradiënt zoals in A met gemiddeld transport omhoog (verdamping). Tijdens koele ochtenden kan juist situatie B ontstaan met gemiddeld transport omlaag (dauwval). In de winter zijn de verticale verschillen doorgaans kleiner, maar kan ook situatie B optreden.

De grootte van de verdampingsflux hangt echter niet alleen af van dit verschil, maar ook van de mate waarin turbulentie in de atmosfeer de waterdamp van het oppervlak kan afvoeren. Wind en turbulente menging zorgen ervoor dat vochtige lucht nabij het oppervlak voortdurend wordt vervangen door drogere lucht uit

hogere luchtlagen, waardoor verdamping kan blijven plaatsvinden. Het concentratieverschil (Figuur 2) hangt mede af van het temperatuurverschil tussen het oppervlak en de atmosfeer. Door de invloed van het temperatuurverschil op de verschillen in waterdampconcentratie kan verdamping ook doorgaan bij een volledig met waterdamp verzadigde atmosfeer op de referentiehoogte. Dit is het geval als de temperatuur van een verdampend oppervlak hoger blijft dan de luchttemperatuur op het referentieniveau. Omgekeerd kan bij onverzadigde atmosfeer de verdamping stoppen of zelfs omslaan in dauwval als het oppervlak kouder wordt dan de atmosfeer op referentiehoogte. Een bekend voorbeeld hiervan is dauwvorming op gras tijdens heldere rustige nachten wanneer het grasoppervlak sterker afkoelt dan de bovenliggende lucht.

De definitie en bepaling van de voor verdamping relevante oppervlaktetemperatuur en de concentratie van waterdamp aan het oppervlak zijn niet eenduidig . Dit komt onder andere doordat verdampend vloeibaar water vanuit veel verschillende plekken (al dan niet natte bladeren op verschillende hoogten in het gewas, vanaf de bodem, etc.) kan bijdragen aan de totale verdamping. De verschillende bronnen hebben een eigen temperatuur die de waterdampconcentratie in de buurt van het vloeibare water bepaalt. De weging van de verschillende bijdragen is lastig. Ook kunnen zouten de concentratie beïnvloeden, zoals op zee.

Potentiële verdamping

De potentiële verdamping (*Ep)* vanaf een oppervlak kan gedefinieerd worden als "de theoretische verdamping die zou optreden wanneer een oppervlak dat voldoende van water is voorzien, blootgesteld wordt aan de heersende meteorologische omstandigheden die onveranderd blijven door het verdampingsproces zelf" (Moors et al., 2002). Deze theoretische beschrijving van de totale verdamping wordt ook wel eens aangeduid als de "atmosferische vraag" naar water voor een gegeven oppervlak. Potentiële verdamping wordt daarmee primair bepaald door meteorologische omstandigheden zoals straling, temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. Er bestaat een groot aantal empirische formules om verdamping aan de hand van waargenomen weersomstandigheden te beschrijven (Shuttleworth, 2012).

Referentieverdamping

De referentieverdamping (ET_0 of E_r) is de verdamping van "een uitgebreid uniform, van buiten droog, grasoppervlak met een hoogte van circa 8-15 cm dat voldoende van water is voorzien" (Moors et al., 2002). Uit de beschrijving blijkt dat het hier in feite om een geïdealiseerde, theoretische transpiratie van een grasland gaat, die geen invloed heeft op de condities in de atmosfeer.

In internationale context volgt men veelal de aanbevelingen van de FAO voor de berekening van deze grootheid (Allan et al., 1998). Hierin worden de micro-meteorologische eigenschappen van het gras gespecificeerd (hoogte = 12 centimeter; albedo of reflectiecoëfficiënt = 0.23; gewasweerstand = 70 seconde per meter) op een manier die toepassing van de zogenoemde Penman-Montheith vergelijking (Monteith, 1965) mogelijk maakt die op dagbasis geldt.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273}\ u2\ (es - ea\ )}{\Delta + \gamma\ (1 + 0.34\mathrm{u2}}$$

$$ETo = \frac{0.408\ \Delta(Rn-G)+\gamma\ \frac{900}{(T+273)} u_2\,(es-ea)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \qquad (1)$$

$$(\mathrm{mm\ d^{-1}})$$

waarin Rn de netto straling is, G de bodemwarmtestroom, T de luchttemperatuur, u_2 de windsnelheid op 2 m hoogte, $(e_s - e_a)$ het dampdruktekort, Δ de helling van de verzadigingsdampdrukcurve en γ de psychrometrische constante.

Deze vergelijking bouwt voort op die van Penman, maar neemt de invloed van gewassen expliciet mee via de gewasweerstand, aannemende dat een gewas beschouwd kan worden als één groot blad met dezelfde ruwheid en reflectiecoëfficiënt (albedo) als het te modelleren gewas ("big-leaf" aanpak). Deze gewasweerstand heeft een grote invloed op de verdeling van de beschikbare energie over de latente- en voelbare warmtestroom.

In Nederland wordt de referentieverdamping door het KNMI (2020b) vaak berekend met behulp van de zogenoemde gemodificeerde Makkink vergelijking volgens De Bruin en Lablans (1998). Deze methode relateert de referentieverdamping voornamelijk aan inkomende kortgolvige straling en, in mindere mate, temperatuur:

$$ET_0 = C\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_s}{\lambda}$$

waarbij Rs de globale straling is, λ de verdampingswarmte en C een empirische calibratiefactor.

De Makkink vergelijking vergt minder informatie dan de Penman-Monteith vergelijking en levert betere resultaten voor gevallen waar de meteorologische waarnemingen niet representatief (kunnen) zijn voor het verdampende oppervlak, met name bij geïrrigeerde vegetatie in overwegend droge gebieden. Een ander voordeel is dat zonnestraling gemakkelijk met behulp van satellieten te meten is. Op die basis kan een goede schatting van de verdamping voor de gedefinieerde graslanden worden verkregen (De Bruin, 2017; De Bruin en Trigo, 2019). De methode gaat uit van een netto bodemwarmtestroom (G) van 0.
Dit is een goede benadering op de tijdschaal van een dag of langer. De methode is dan ook in eerste instantie geschikt voor berekening van de dagelijkse verdamping. Droogers (2009) heeft de uitkomsten van E_r volgens Makkink en Penman-Monteith met elkaar vergeleken en komen tot de conclusie dat de Makkink methode naar wat lagere waarden neigt dan Penman-Monteith, met name bij droge condities.

Referentieverdamping voor andere gewassen en vegetatie
De referentieverdamping geldt voor een gestandaardiseerd grasoppervlak, maar kan omgerekend worden naar de gewasreferentieverdamping of potentiële verdamping van een specifiek gewas (E_g) door de referentieverdamping (E_r) te vermenigvuldigen met een gewasfactor (f):

$$E_g = f \cdot E_r$$

Het idee achter deze methode is dat de invloed van meteorologische omstandigheden op de verdamping gescheiden kunnen worden van de invloed door de eigenschappen van het gewas en zijn groeistadia. Daarbij worden steeds optimale groeiomstandigheden verondersteld en onbeperkte waterbeschikbaarheid verondersteld. De gewasfactoren moeten via metingen worden vastgesteld en zijn specifiek voor methodes en regio's. In Nederland worden traditioneel de gewasfactoren van Feddes (1987) gebruikt (Figuur 3) in combinatie met de verdamping volgens Makkink (De Bruin en Lablans, 1998, Moene & Van Dam, 2014).

	april			mei			juni			juli			augustus			september		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
gras	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
granen	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.6					
mais				0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
aardappelen					0.7	0.9	1.0	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.7		
suikerbieten				0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1
peulvruchten		0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0.8							
plantuien	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0					
zaaiui		0.4	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7		
witlof							0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
winterpeen							0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
knolselderij						0.5	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	
prei					0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
bol/knolgewassen					0.5	0.7	0.7	0.9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
pit/steenvruchten	1.0	1.0	1.0	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2

Figuur 3. Gewasfactoren voor gebruik met de referentieverdamping volgens Makkink (Feddes, 1987). De factoren gelden per decade.

Internationaal wordt veelal gewerkt met gewasfactoren die zijn afgeleid voor gebruik in combinatie met de Penman-Monteith referentieverdamping (Allen et al., 1998). Voor toepassingen op lokale schaal worden gewasfactoren steeds vaker dynamisch bepaald op basis van gewasontwikkeling, modelberekeningen of satellietwaarnemingen. De vergelijking volgt het zelfde concept als Makkink en is een vermenigvuldiging van de referentieverdamping met en gewasfactor:

$$ETc = Kc \cdot ET0$$

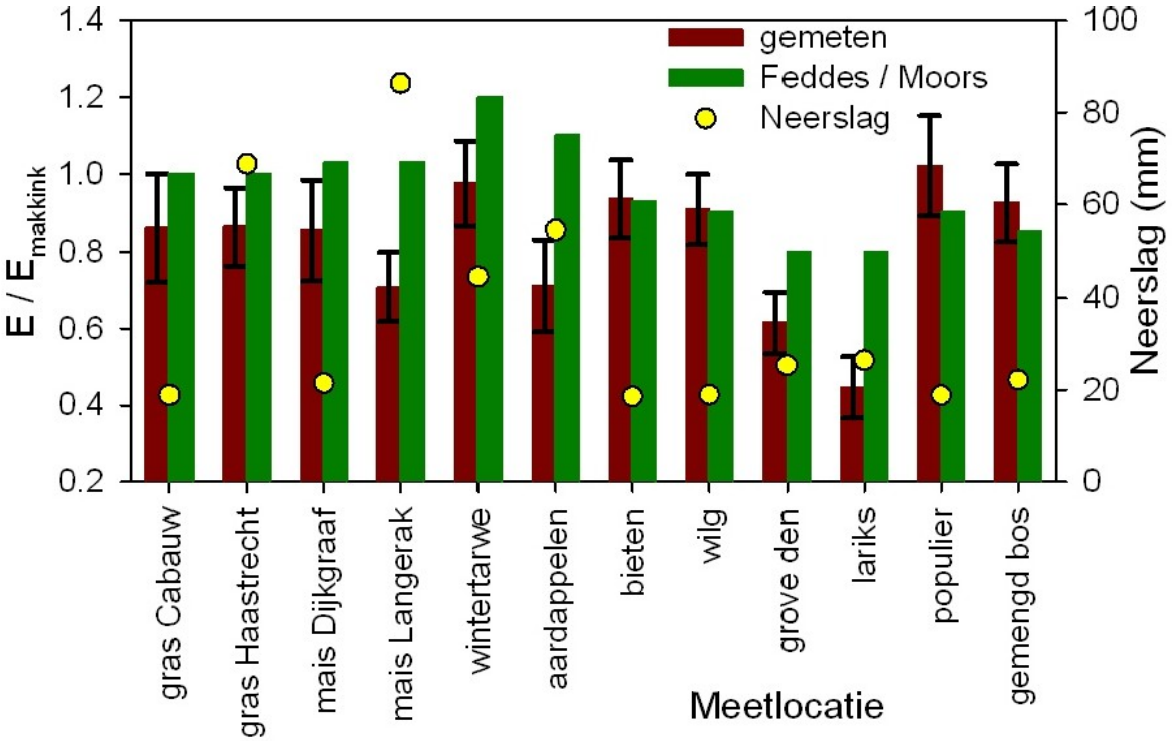
Referentieverdamping als maat voor werkelijke (actuele) verdamping

De werkelijke verdamping (ook wel actuele verdamping genoemd; ET_a) is de hoeveelheid water die daadwerkelijk verdampt. In Nederland vormt de referentieverdamping onder goed water voorziene omstandigheden een goede benadering van de actuele verdamping van een goed van water voorziene referentiegewas (De Bruin & Lablans, 1998; De Bruin et al., 2016). Voor andere gewassen kan de actuele verdamping worden geschat met behulp van gewasfactoren (Jacobs & De Bruin, 1998).

Voor veel toepassingen in het waterbeheer, zoals droogtemonitoring, neerslagtekorten, peilbeheer en operationele waterverdeling, is referentieverdamping daarom een bruikbare en robuuste maat. Bij toepassingen waarbij de daadwerkelijke waterbeschikbaarheid of de waterbalans centraal staat, is actuele verdamping echter vaak relevanter. De referentieverdamping wijkt af van de actuele verdamping in de volgende situaties:

Beperkte waterbeschikbaarheid

Tijdens droogte neemt de actuele verdamping af doordat minder water beschikbaar is in de wortelzone. Metingen op verschillende locaties in Nederland laten zien dat de actuele verdamping op jaarbasis kan dalen tot circa 70% van de referentieverdamping, met grotere afwijkingen tijdens droge zomermaanden (Elbers et al., 2009; Figuur 4). Een beperkte uitdroging heeft vaak nog weinig invloed op de transpiratie, maar zodra vochtstress optreedt neemt de verdamping transpiratie af en tevens de bodemverdamping doordat de bovenste laag snel uitdroogt (Verhoef & Egea, 2014). Bomen kunnen de verdamping daarbij vaak langer op peil houden dan gras doordat zij water uit diepere bodemlagen benutten (Teuling et al., 2010).



Figuur 4. Verhouding tussen actuele verdamping uit metingen en de referentieverdamping volgens Makkink, in de maand juni van het meetjaar. Per locatie kan het meetjaar verschillen. De groene balken geven de gewasfactor volgens Feddes (1987) voor landbouwgewassen en Moors et al. (1996) voor bossen. De gele punten laten de maandsom van de neerslag zien. Zie bron (Elbers et al., 2009) voor meer details.

Vegetatie en landgebruik

De relatie tussen referentie- en actuele verdamping verschilt per vegetatietype en standplaats. Onder warme en droge omstandigheden sluiten planten hun huidmondjes gedeeltelijk, waardoor de actuele verdamping afneemt terwijl de referentieverdamping juist toeneemt (Jacobs & De Bruin, 1997). Daarnaast kunnen factoren zoals bewortelingsdiepte, bodemvruchtbaarheid, zoutgehalte en ondoorlatende bodemlagen de wateropname beperken (Allen et al., 1998). Ook veranderingen in de atmosferische CO_2-concentratie kunnen de relatie tussen referentie- en actuele verdamping beïnvloeden, waardoor gewasfactoren in de toekomst mogelijk moeten worden herijkt (Kruijt et al., 2008).

Open water, interceptie en stedelijk gebied

Referentieverdamping houdt geen expliciete rekening met interceptieverdamping of met de afwijkende energiebalans van open water. In bossen kan onderschepte neerslag een belangrijk deel van de totale verdamping vormen (Shuttleworth & Calder, 1979). Ook in stedelijk gebied dragen bomen, groene daken, gevelgroen en stedelijk oppervlaktewater bij aan de totale verdamping (Jacobs et al., 2015). Dit draagt bij aan koeling en daarmee een verbetering van de leefbaarheid van het stedelijk gebied. Voor toepassingen zoals peilbeheer, stedelijk waterbeheer en klimaatadaptatie. is daarom meer inzicht nodig in de werkelijke verdamping van verschillende landbouwgewassen. Daarbij zijn niet alleen de hydrologische effecten, maar ook opbrengsten en verdienmodellen van belang. Specifieke aandacht is nodig voor gewassen met een relatief laag watergebruik, zoals graansoorten en vezelgewassen en hun potentie bij klimaatadaptatie.

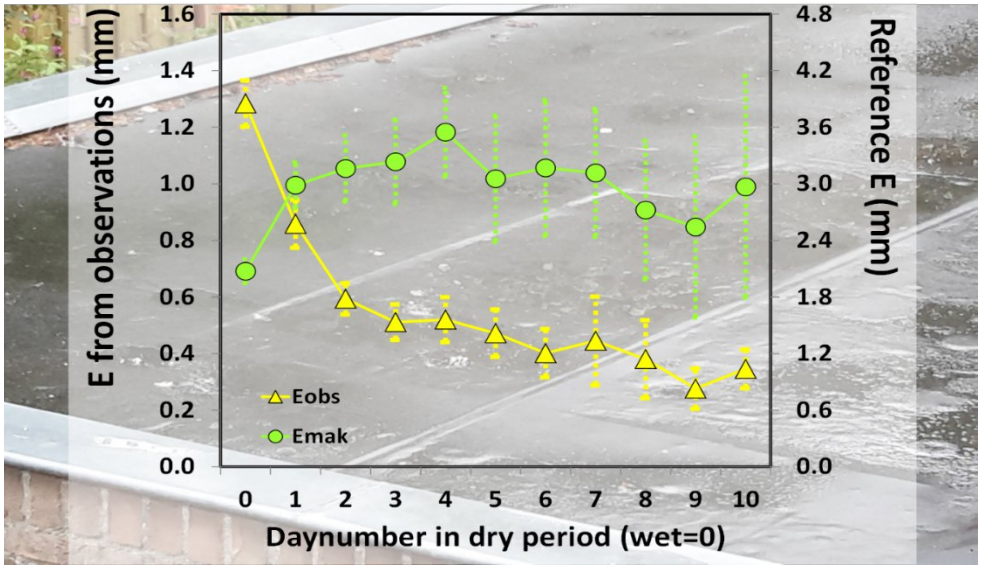
Regionale schaaleffecten

Bij regionale toepassingen kunnen terugkoppelingen tussen het landoppervlak en de atmosfeer ontstaan, waardoor de atmosferische vraag zelf verandert. Hierdoor neemt de toepasbaarheid van referentieverdamping als benadering van de actuele verdamping af, bijvoorbeeld bij grootschalige irrigatie, landgebruiksveranderingen en regionale klimaatanalyses (De Bruin, 1983; McNaughton & Spriggs, 1986; Jacobs & De Bruin, 1992; Van Heerwaarden et al., 2009; Blyth & Jacobs, 2011).

Verdamping van stedelijk gebied

Hoewel de kennis over verdamping in stedelijk gebied de afgelopen jaren sterk is toegenomen, zijn metingen en modellering nog altijd uitdagend vanwege de grote ruimtelijke heterogeniteit van stedelijke oppervlakken. In vergelijking met natuurlijke- en agro-ecosystemen is de verdamping van stedelijk gebied doorgaans lager is ten opzichte van die in het landelijk gebied. Dit komt doordat natuurlijke oppervlakken zoals vegetatie en open water zijn vervangen door ondoordringbare oppervlakken, waar het regenwater doorgaans snel wordt afgevoerd en niet meer beschikbaar is voor verdamping (Swart et al., 2012). De verminderde verdamping draagt bij aan het stedelijk hitte-eilandeffect. Tegelijkertijd kunnen stedelijke bomen, parken, wadi's, groene daken en andere groenblauwe maatregelen lokaal juist substantiële hoeveelheden water verdampen en daarmee bijdragen aan verkoeling van de leefomgeving.

Verdamping van gebouwd gebied met relatief weinig vegetatie gedraagt zich niet volgens de fysische principes en aannames achter de referentieverdamping (Jacobs et al., 2015; Oke et al., 2017). Oorzaken zijn de soms grote bijdrage van interceptieverdamping van daken, wegen en andere infrastructuur en bijdragen aan de energiebalans die specifiek zijn voor stedelijk gebied (bijvoorbeeld verwarming van huizen en warmte-uitstoot door verkeer). Eerder onderzoek in het centrum van Arnhem laat zien dat dit leidt dit tot een hogere verdamping in de winter en op regendagen, ondanks de lagere stralingsintensiteit (Jacobs et al., 2015; Figuur 5).



Figuur 5. Gemeten dagelijkse verdamping van het centrum van Arnhem (driehoeken, linker as) en berekende referentieverdamping (cirkels, rechteras) in millimeter per dag, voor verschillende dagen in een droge periode volgend op een dag met neerslag. Dag 0 is een dag met neerslag, dag 1 is de daarop volgende eerste droge dag, dag 2 de tweede droge dag etc.. De gemeten verdamping op natte dagen is duidelijk hoger dan op de daarop volgende droge dagen. De verdamping wordt minder naarmate de droge periode langer duurt. De referentieverdamping is juist kleiner op de natte dagen en blijft ongeveer gelijk in de daarop volgende droge periode. Let op het schaalverschil tussen de linker- en de rechteras: de

referentieverdamping is op droge dagen 2 à 3 maal zo groot als de actuele verdamping. De figuur is gebaseerd op metingen in de periode 1 juli 2012 – 31 december 2015. Zie Jacobs et al. (2015) voor een beschrijving van de metingen.

Tegelijk zijn ook stedelijke ontwerpprincipes relevant voor klimaatadaptatie en de leefbaarheid. Zo zet Almelo in op groene longen en groen-blauwe structuren die bijdragen aan schaduw en verkoeling. Dit biedt aanleiding om te onderzoeken hoe verschillende stedelijke ontwikkelingsprincipes de lokale verdamping en hittestress beïnvloeden. (Gemeente Almelo, 2022).

Open water

Ook de energiebalans van open water komt niet overeen met de veronderstellingen die ten grondslag liggen aan de energiebalans van met vegetatie begroeide oppervlakken. Met name kortgolvige zonnestraling dringt gedeeltelijk door in de waterkolom en wordt daar geabsorbeerd, waardoor warmte niet uitsluitend aan het oppervlak wordt opgenomen. In combinatie met de grotere warmtecapaciteit kan er meer warmte opgeslagen worden in het waterlichaam, wat zorgt voor een vertraging van de verdamping ten opzichte van de binnenkomende zonnestraling. Dit leidt tot een duidelijk ander gedrag van de verdamping dan op het land, vooral op de wat kortere tijdschaal (Jansen en Teuling, 2020).

De grootte van deze warmteopslag en de daaruit voortvloeiende verdamping hangen af van eigenschappen zoals waterdiepte, menging, stratificatie en verblijftijd van het water. Bij grotere en wat diepere waterlichamen zoals de Noordzee en het IJsselmeer golfvorming de uitwisseling van warmte en waterdamp beïnvloeden door veranderingen in de aerodynamische ruwheid en turbulentie van het wateroppervlak (zie DeCosmo et al. (1996) en Oost et al., (2000) voor resultaten van verdampingsmetingen op de Noordzee).

Omdat de karakteristieken van het golfveld enigszins gecorreleerd zijn met windsnelheid, die tevens een sterke invloed heeft op turbulentie, worden verdampingschattingen van open water tegenwoordig vaak gebaseerd windsnelheid en het verschil in waterdampconcentratie (zie Jansen en Teuling, 2020, voor een overzicht van dergelijke methodes).

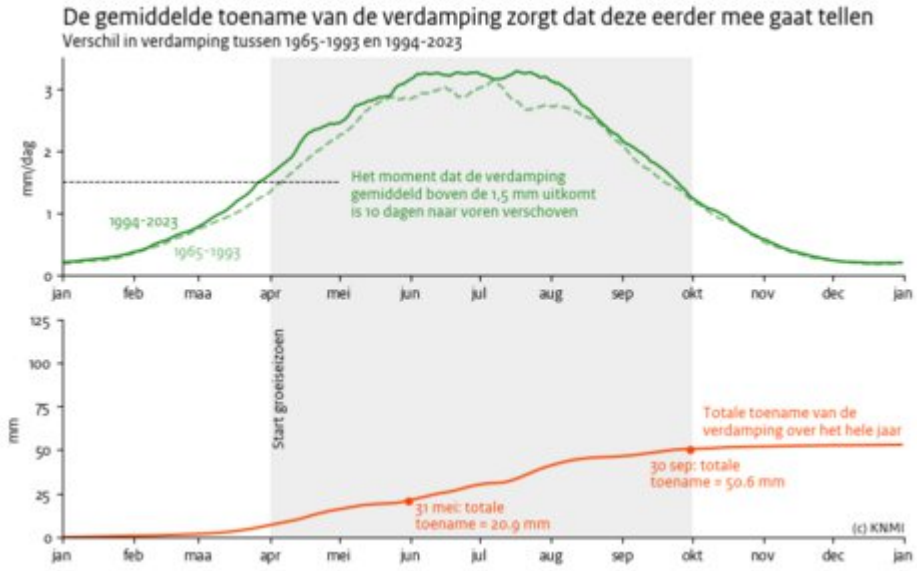
Effecten van klimaatverandering op verdamping

Klimaatmodellen laten zien dat de toenemende concentratie van broeikasgassen leidt tot veranderingen in de energie- en watercyclus. Voor Nederland wordt daarom een toename van de referentieverdamping verwacht (Droogers, 2009; Bessembinder

et al., 2023). Sinds 1991 nam de referentieverdamping in Nederland in de lente met circa 18% toe en in de zomer met circa 12% (KNMI, 2023). Deze bevinding sluit aan bij eerdere studies waarin een sterke relatie tussen verdamping en straling in Midden-Europa werd aangetoond (Teuling et al., 2009).

Eerder begin van het droogteseizoen

Door hogere temperaturen en een toename van de verdampingsvraag begint het droogteseizoen tegenwoordig eerder dan enkele decennia geleden. In de recente periode komt de referentieverdamping gemiddeld ongeveer tien dagen eerder boven 1,5 mm/dag uit dan in de periode rond 1965–1993. Hierdoor kan het neerslagtekort eerder in het voorjaar ontstaan en langer aanhouden (KNMI, 2024, Figuur 6).



Figuur 6. Toename van de referentieverdamping van de eerste helft (1965-1993) naar de tweede helft van de meetperiode (1994-2023). In groen de gemiddelde referentieverdamping voor iedere dag in het jaar in de twee periodes, in rood het totale verschil opgeteld over het jaar. (bron: KNMI, 2023)

De uiteindelijke ontwikkeling van de actuele verdamping wordt bepaald door het samenspel van veranderingen in straling, temperatuur, neerslag, bodemvocht, vegetatie en atmosferische circulatie. Hierdoor kunnen trends in actuele verdamping regionaal sterk verschillen. Voor waterbeheer is vooral relevant hoe deze veranderingen doorwerken in de waterbalans en in de groei en opbrengst van verschillende gewassen. Het kwantificeren van deze veranderingen onder toekomstige klimaatcondities blijft daarom een belangrijk onderzoeksthema (Van Heerwaarden et al., 2010; Fisher et al., 2017).

Grondgebruik

Uit een klimaatstudie van Vechtstromen blijkt bovendien dat aanpassingen in het grondgebruik mogelijk een aanzienlijk groter effect heeft op de waterbeschikbaarheid dan het verminderen van drainage (Waterschap Vechtstromen, 2024). Dit onderstreept het belang van de omvang van het areaal waarop maatregelen worden toegepast. Wanneer aanpassingen in landgebruik op grotere schaal worden doorgevoerd, bijvoorbeeld op stroomgebiedsniveau, kunnen deze een substantieel effect hebben op de regionale waterbalans. Tegelijkertijd is nog onvoldoende bekend over de werkelijke verdamping van verschillende landbouwgewassen en hoe deze onder veranderende klimaatomstandigheden verandert. Het kwantificeren van gewasspecifieke verdamping en de effecten van veranderingen in landgebruik is daarom essentieel om deze kansrijke richting voor klimaatadaptatie daadwerkelijk vorm te geven.

Rol van vegetatie en CO_2

Naast meteorologische veranderingen spelen ook veranderingen in waterbeschikbaarheid en plant fysiologische processen een belangrijke rol. Toenemende droogte en een lagere beschikbaarheid van bodemvocht kunnen bodemverdamping en transpiratie beperken. Daarnaast leidt een hogere CO_2-concentratie naar verwachting tot een hogere gewasweerstand, waardoor de transpiratie afneemt (Kruijt et al., 2008; Droogers, 2009; Harding et al., 2011). Mogelijk worden ook optimale temperaturen voor fotosynthese vaker overschreden, waardoor planten hun huidmondjes sluiten en de transpiratie verder afneemt. Dit effect kan worden versterkt door terugkoppelingen tussen vegetatie en atmosfeer, bijvoorbeeld door een toenemende atmosferische droogte (Jacobs en De Bruin, 1997). Tijdens hittegolven en langdurige droogte neemt de atmosferische vraag naar water sterk toe. Wanneer de bodem uitdroogt, sluiten planten hun huidmondjes gedeeltelijk, waardoor minder energie wordt gebruikt voor verdamping en meer energie beschikbaar komt voor opwarming van het oppervlak. Dit kan hitte en droogte verder versterken (Jacobs en De Bruin, 1997; Teuling et al., 2010). Voor klimaatadaptatieopgaven is daarom van belang om per gewas de effecten van een langer groeiseizoen, een hogere verdampingsvraag en droogtestress op zowel de waterbalans als de gewasopbrengst te kwantificeren. Dit biedt inzicht in welke gewassen en vormen van landgebruik onder toekomstige klimaatomstandigheden kansrijk zijn en welke aanpassingen van de landbouw nodig zijn. Zo kan een hogere verdamping zowel een positief effect hebben, bijvoorbeeld door een langer groeiseizoen en een hogere potentiële gewasproductie, als een negatief effect wanneer de toenemende verdampingsvraag leidt tot bodemvochttekort, hittestress en sluiting van huidmondjes.

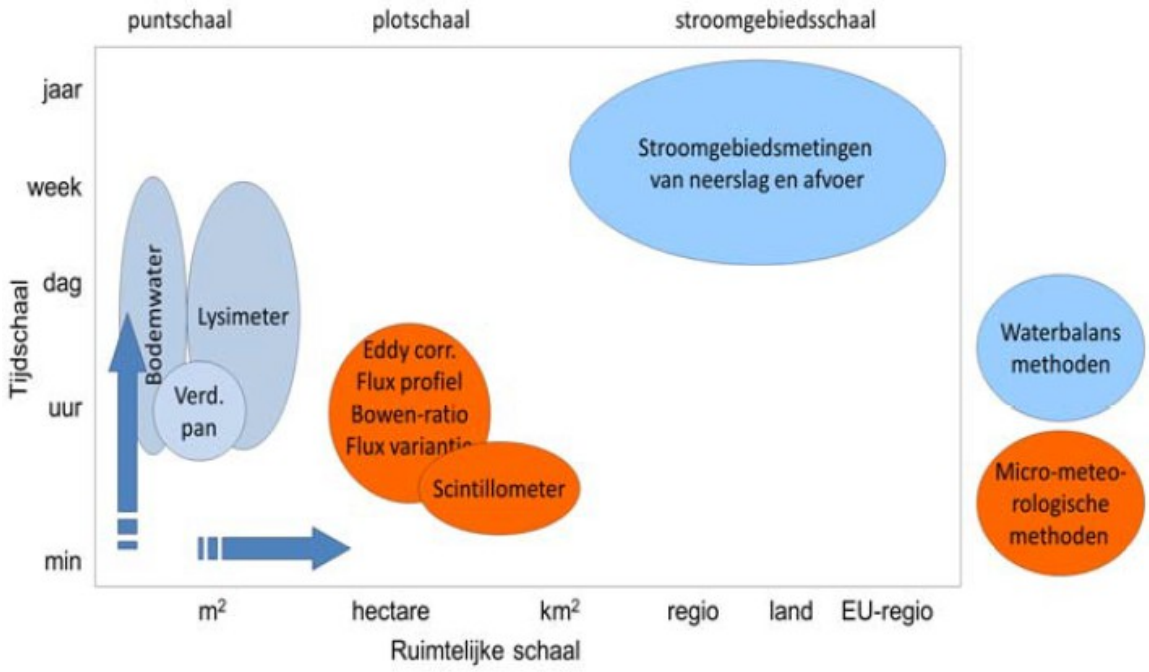
Uiteindelijk kan de kennis over verdamping worden vertaald naar concrete handelingsperspectieven voor boeren en naar keuzes over landgebruik en klimaatadaptatie op regionaal en nationaal niveau.

4. Meten van verdamping

Voor het meten van de (actuele) verdamping zijn verschillende methoden beschikbaar. De keuze voor een meetmethode hangt af van de onderzoeksvraag, de gewenste ruimtelijke en temporele schaal en de benodigde nauwkeurigheid. Geen enkele methode is onder alle omstandigheden optimaal. Daarom worden in de praktijk vaak verschillende meetmethoden gecombineerd. Figuur 7 geeft een overzicht van de relatie tussen de ruimtelijke en temporele schaal van de belangrijkste meettechnieken (NHV-Werkgroep Verdamping, 2015).

In-situ meettechnieken

In-situ metingen kunnen worden onderverdeeld in waterbalansmethoden en micro-meteorologische methoden. Waterbalansmethoden bepalen de verdamping als sluitpost van de waterbalans, terwijl micro-meteorologische methoden de uitwisseling van waterdamp tussen het aardoppervlak en de atmosfeer meten of afleiden.



Figuur 7. Schematisch overzicht van relatie tussen ruimtelijke en temporele resolutie (d.w.z. de oppervlakte en de tijdsperiode die nodig zijn om zinnige metingen te verkrijgen) van de verschillende technieken die gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de verdamping. Hierbij zijn de methoden in twee groepen verdeeld: methoden die gebruik maken van de waterbalans en methoden die gebaseerd zijn op micro-meteorologische technieken (bron: NHV-Werkgroep Verdamping, 2015).

Waterbalansmethoden

Waterbalansmethoden zijn vooral geschikt voor het bepalen van de verdamping op perceel- tot stroomgebiedsniveau. De verdamping wordt hierbij berekend uit de neerslag (P), afvoer (Q) en verandering in waterberging (ΔS):

$$E = P - Q - \Delta S \quad (2)$$

Tabel 1 geeft een overzicht van de meest gebruikte waterbalansmethoden.

Tabel 1: Overzicht van waterbalansmethoden voor het bepalen van de actuele verdamping (gebaseerd op Allen et al., 2011; NHV-Werkgroep Verdamping, 2015).

Methode	**Ruimtelijke schaal**	**Voordelen (+) en beperkingen (−)**
Verdamping op basis van afvoermetingen	Stroomgebied (10^3–10^9 m²)	+ Integrale schatting van de verdamping op stroomgebiedsniveau. − Alleen betrouwbaar wanneer de waterbalans goed kan worden gesloten.
Bodemwaterverandering	0,1–0,5 m²	+ Geschikt voor meerdaagse waterbalansen en bodemvochtmetingen. − Minder geschikt voor korte tijdschalen (< 1 dag).
Lysimeter	0,1–10 m²	+ Zeer nauwkeurige meting van de actuele verdamping; geschikt voor modelvalidatie. − Kostbaar, arbeidsintensief en beperkt representatief voor grotere oppervlakken.
Verdampingspan	ca. 1 m²	+ Eenvoudig en goedkoop; indicatie van de atmosferische verdampingsvraag. − Niet representatief voor de actuele verdamping zonder correctiefactoren.

Micro-meteorologische methoden

Micro-meteorologische methoden zijn gebaseerd op atmosferische metingen en worden vooral toegepast voor procesonderzoek, modelvalidatie en continue monitoring. Afhankelijk van de methode wordt de verdamping direct gemeten of indirect afgeleid uit de energie- of massabalans (Tabel).

Tabel 2: Overzicht van micro-meteorologische methoden voor het bepalen van de actuele verdamping (gebaseerd op NHV-Werkgroep Verdamping, 2015).

Methode	Minimale tijdschaal	Ruimtelijke schaal	Voordelen (+) en beperkingen (−)
Eddy-covariantie	30 min	100–1000 m	+ Directe, continue metingen; internationale referentiemethode. − Complexe meetopstelling en specialistische verwerking.
Bowen-ratio	30 min	100–1000 m	+ Relatief eenvoudig en goedkoper dan eddy-covariantie. − Indirecte methode; aanvullende energiebalansmetingen nodig.
Fluxprofielmethode	30 min	100–1000 m	+ Bruikbaar alternatief voor turbulente fluxmetingen. − Berust op aannames en is gevoelig voor terreinovergangen.
Scintillometer	10 min	100–4000 m	+ Gebiedsgemiddelde verdamping over grote afstanden. − Kostbare apparatuur en aanvullende metingen nodig.
DTS (glasvezeltechniek)	1–30 s	Afhankelijk van kabellengte	+ Zeer hoge ruimtelijke resolutie langs kabeltracés. − Arbeidsintensief en gevoelig voor omgevingsinvloeden.

Satellietwaarnemingen

Satellietwaarnemingen worden steeds vaker gebruikt om de ruimtelijke variatie in verdamping in beeld te brengen. Satellieten leveren informatie over onder meer oppervlaktetemperatuur, vegetatie, bodemvocht en straling, die wordt gecombineerd in verdampingsmodellen. In Nederland worden deze producten onder andere toegepast voor droogtemonitoring, operationeel waterbeheer en landbouwkundige toepassingen. Ruimtelijke verschillen zijn echter niet altijd duidelijk aantoonbaar, onder meer door de beperkte resolutie en onzekerheden in satellietproducten of tijdens weersextremen (droogtetekorten). Een belangrijke onderzoeksvraag is daarom in hoeverre satellietgegevens, gecombineerd met lokale metingen en informatie over landgebruik en wateraanvoer, bruikbaar zijn om droogtestress en regionale verschillen in de waterbalans tijdig te signaleren.

Combinatie van meetmethoden

De keuze voor een meetmethode hangt af van de toepassing. Waterbalansmethoden zijn vooral geschikt voor integrale waterbalansen op perceel- en stroomgebiedsniveau. Micro-meteorologische technieken worden voornamelijk ingezet voor procesonderzoek, modelvalidatie en continue metingen van de actuele verdamping.
Satellietwaarnemingen bieden een ruimtelijk dekkend beeld en zijn daardoor geschikt voor regionale analyses en operationeel waterbeheer. In de praktijk worden veldmetingen, satellietwaarnemingen en hydrologische modellen steeds vaker gecombineerd om zowel de nauwkeurigheid als de ruimtelijke dekking van verdampingsschattingen te verbeteren.

5. Beschikbare datasets

Voor het bepalen van verdamping zijn verschillende databronnen beschikbaar op basis van meteorologische metingen, veldmetingen, satellietwaarnemingen en hydrologische modellen. De keuze hangt af van de ruimtelijke schaal, de gewenste tijdsresolutie en de toepassing. Tabel 3 geeft een overzicht van de meest gebruikte databronnen voor het Nederlandse waterbeheer.

Tabel 3: Overzicht van veelgebruikte databronnen en toepassingen.

Toepassing	Databron/indicatoren	Schaal	Voordeel	Beperking
Droogtemonitoring en droogteindicatoren	KNMI - meteorologische metingen en SPEI (internationaal)	Regionaal / nationaal	Snel beschikbaar, lange consistente tijdreeks	Indirecte maat voor watergebruik
Waterbalansen en operationeel waterbeheer	LHM en regionale NHI-modellen – hydrologische modellen	Regionaal / nationaal	Integreert hydrologische processen	Afhankelijk van modelstructuur en invoergegevens
Ruimtelijke monitoring en gebiedsanalyses	Copernicus Sentinel / SatData – satellietdata gecombineerd met meteorologie en modellen	Lokaal tot regionaal	Ruimtelijk dekkend	Afhankelijk van modelaannames en satellietwaarnemingen
Klimaatonderzoek en hydrologische analyses	ERA5-Land, GLEAM – re-analysemodel en satellietproducten	Regionaal / mondiaal	Lange consistente tijdreeksen	Minder geschikt voor lokale toepassingen
Modelvalidatie en procesonderzoek	ICOS Nederland – eddy-covariantiemetingen	Perceel / lokaal	Directe meting van water- en energiestromen	Kostbaar en beperkt aantal meetlocaties
Landbouw en irrigatie	SWAP – bodem-plant-atmosfeermodel	Perceel / regionaal	Gedetailleerde simulatie van gewasverdamping	Vereist veel invoergegevens
Openwaterbeheer	Openwaterverdampingsmethoden – metingen of energiebalansmodellen	Waterlichaam	Specifiek voor open water	Sterk afhankelijk van lokale omstandigheden
Stedelijk waterbeheer	Satellietproducten, lokale metingen en modellen	Lokaal / stedelijk	Ruimtelijk inzicht in hitte en groenblauwe maatregelen	Sterk heterogene omgeving

Verdampingsgegevens worden ook gebruikt voor droogtemonitoring. In Nederland vormt de Makkink-referentieverdamping de basis voor het potentiële neerslagtekort, een belangrijke indicator voor operationeel droogtebeheer (STOWA, 2023). Internationaal wordt daarnaast veel gebruikgemaakt van de Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), waarin naast neerslag ook de atmosferische verdampingsvraag wordt meegenomen (Vicente-Serrano et al.,

2010). Ook gemeten afvoeren (debieten) worden gebruikt als indicator voor droogte, omdat deze de hydrologische respons van een stroomgebied weerspiegelen.
Voor het vroegtijdig signaleren van droogtestress worden daarnaast steeds vaker satellietproducten van de actuele verdamping gebruikt. Voor bredere operationele toepassing zijn betrouwbare, voldoende actuele en ruimtelijk gedetailleerde producten nodig, die goed aansluiten op bestaande droogtemonitoring en worden gevalideerd met lokale metingen. Naast de operationele datasets zijn ook onderzoeksdatasets beschikbaar, zoals historische lysimetermetingen (o.a. van Castricum), Distributed Temperature Sensing (DTS) en internationale meetnetwerken zoals FLUXNET. Deze worden vooral gebruikt voor de ontwikkeling, kalibratie en validatie van verdampingsproducten en hydrologische modellen.

Verdamping is een essentieel onderdeel van hydrologische modellen. Eenvoudige modellen gebruiken vaak de gewasfactormethode terwijl procesgeoriënteerde modellen de actuele verdamping expliciet berekenen met de Penman-Monteith vergelijking waarbij onder meer bodemvocht, gewasweerstand en de energiebalans worden meegenomen. In Nederland worden hiervoor onder andere het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), regionale NHI-modellen, SWAP en Waterwijzer Landbouw (WWL), Waterwijzer Natuur (WWN) toegepast.

6. Toepassing in hydrologische modellen

Hydrologische modellen gebruiken verdampingsgegevens om waterbalansen, grondwaterstanden en de beschikbaarheid van zoetwater te berekenen. Afhankelijk van de modelopzet wordt de verdamping berekend op basis van referentieverdamping in combinatie met gewasfactoren of met procesgeoriënteerde methoden, zoals Penman-Monteith, waarbij ook bodemvocht, gewasweerstand en de energiebalans worden meegenomen (Tabel 4).

Tabel 4. Verdamping in veelgebruikte hydrologische modellen.

Model	Schaal / toepassing	Verdampingsberekening	Aandachtspunt
Landelijk Hydrologisch Model (LHM)	Nationaal waterbeheer, droogte- en waterbalansen	Penman-Monteith; gewasverdamping en openwaterverdamping afhankelijk van modelversie	Controleer gebruikte modelversie en parameterisatie
Regionale NHI-	Waterbeheer door	Afhankelijk van de regionale	Resultaten zijn niet altijd

modellen	waterschappen en provincies	modelopzet	vergelijkbaar tussen regio's
SWAP	Bodem-plant-atmosfeersysteem op perceelschaal	Meerdere opties mogelijk, waaronder Penman-Monteith of referentieverdamping (bijvoorbeeld Makkink of Priestley-Taylor) in combinatie met gewasfactoren	Vereist gedetailleerde invoergegevens en een bewuste keuze van de verdampingsmethode
Waterwijzer Landbouw	Effecten van waterbeheer op landbouw en droogteschade	Gebaseerd op SWAP en bodem-plant-atmosfeerprocessen	Uitkomsten zijn afhankelijk van de hydrologische invoer en modelinstellingen
Waterwijzer Natuur	Effecten van waterbeheer op terrestrische natuur	Gebaseerd op SWAP en vegetatie-specifieke respons op grondwater en bodemvocht	Vooral geschikt voor beoordeling van hydrologische randvoorwaarden voor natuur
WALRUS	Operationele hydrologie en afvoerberekeningen, vooral laag Nederland	Referentieverdamping als invoer voor de onverzadigde zone	Conceptueel model; verdamping wordt niet expliciet procesmatig berekend

7. Praktijkervaring en lopend onderzoek

De beschikbaarheid en kwaliteit van verdampingsinformatie nemen snel toe door de combinatie van veldmetingen, satellietwaarnemingen en modelontwikkeling. Voor waterbeheerders zijn vooral de volgende initiatieven relevant:

- ICOS Nederland: continue metingen van de actuele verdamping boven verschillende ecosystemen voor modelvalidatie.
- Ruisdael Observatory: geïntegreerde metingen van atmosfeer, bodem en vegetatie ter verbetering van hydrologische en meteorologische modellen.
- SWM-EVAP: ontwikkeling van verbeterde methoden voor het bepalen van openwaterverdamping.
- Copernicus/Sentinel en SatData: ruimtelijke schattingen van de actuele verdamping op regionale en landelijke schaal.

Daarnaast worden historische lysimetermetingen, zoals die in Castricum, gebruikt voor de validatie van modellen en langjarige analyses van de waterbalans. Ook innovatieve technieken, zoals Distributed Temperature Sensing (DTS) en internationale meetnetwerken, zoals FLUXNET, dragen bij aan de ontwikkeling en validatie van nieuwe verdampingsproducten. Tegelijkertijd worden satellietwaarnemingen, sensordata en hydrologische modellen steeds vaker gecombineerd om de ruimtelijke bepaling van de actuele verdamping verder te verbeteren en

beter toepasbaar te maken voor operationeel waterbeheer.

8. Kosten en baten

De kosten van verdampingsmetingen lopen sterk uiteen en zijn afhankelijk van de gewenste ruimtelijke schaal, meetduur en nauwkeurigheid. Naast de investering in apparatuur bepalen ook installatie, onderhoud, dataverwerking, kwaliteitscontrole en de benodigde expertise de totale kosten. De meest kosteneffectieve meetmethode hangt daarom af van de toepassing. Tabel 5 geeft een indicatief overzicht van de investeringskosten, toepassingsschaal en belangrijkste baten van veelgebruikte meetmethoden.

Tabel 5: Overzicht van de investeringskosten, toepassingsschaal en belangrijkste baten veelgebruikte meetmethoden.

Methode	**Indicatieve investering**	**Ruimtelijke schaal**	**Baten**
Waterbalans (afvoer-/debietmetingen)	Hoog (Afhankelijk van bestaand meetnet)	Stroomgebied	Integrale schatting van de verdamping op stroomgebiedsniveau en inzicht in de regionale waterbeschikbaarheid.
Bodemvochtsensoren	Laag	Punt	Inzicht in bodemvochtbeschikbaarheid (verticaal profiel), droogtestress en irrigatiebehoefte; relatief lage kosten en eenvoudig te installeren.
Lysimeter	Middel–hoog	Punt	Zeer nauwkeurige bepaling van de actuele verdamping.belangrijk voor onderbouwing en validatie van verdampingsmodellen.
Verdampingspan	Laag	Punt	Eenvoudige en goedkope indicatie van de atmosferische verdampingsvraag; vooral geschikt voor langjarige monitoring en vergelijking.
Eddy-covariantie	Hoog	Perceel tot landschap	Continue, directe meting van water-, energie- en CO_2-uitwisseling; ibelangrijke referentie voor modellen en satellietproducten.
Bowen-ratio	Middel	Perceel	Relatief eenvoudige bepaling van de energiebalans en verdamping onder homogene omstandigheden.
Fluxprofielmethode	Middel–hoog	Perceel	Inzicht in turbulente uitwisseling van waterdamp; bruikbaar wanneer eddy-covariantie niet mogelijk is.
Scintillometer	Hoog	Landschap	Bepaling van gebiedsgemiddelde verdamping over grote oppervlakken; relevant voor regionale waterbalansen en klimaatadaptatie.
DTS (glasvezeltechniek)	Hoog	Lijnvormig	Zeer hoge ruimtelijke resolutie; geschikt voor onderzoek naar ruimtelijke variatie in bodemvocht, kwel en lokale verdampingsprocessen.
Satellietproducten	Laag–middel	Regionaal tot nationaal	Ruimtelijk dekkende verdampingskaarten; geschikt voor grootschalige droogtemonitoring, operationeel waterbeheer en klimaatadaptatie

De laagste investeringskosten leiden niet automatisch tot de meest kosteneffectieve oplossing. De keuze voor een meetmethode hangt af van de vereiste nauwkeurigheid en het

beoogde gebruik. Goedkope methoden, zoals bodemvochtsensoren en satellietproducten, zijn geschikt voor operationele monitoring, terwijl duurdere methoden, zoals eddy-covariantie, lysimeters en scintillometers, vooral waardevol zijn voor modelvalidatie en langjarige monitoring. Wanneer verdamping wordt beschouwd als een sleutelvariabele voor de Nederlandse water- en klimaatopgave, kunnen betrouwbare verdampingsgegevens bovendien bijdragen aan onderbouwde keuzes voor landbouw, natuur, stedelijk waterbeheer en klimaatadaptatie.

9. Governance

Verdamping is een van de belangrijkste termen en tegelijk onzekerste termen in de waterbalans van het Nederlandse waterbeheer. Voor het bepalen van verdamping zijn veel verschillende methoden beschikbaar zowel voor het meten als het berekenen van verdamping. Onder andere resolutie, locatie, grootte meet/interessegebied, gekozen meettechniek(en), type model, hebben een grote invloed op de nauwkeurigheid van de uiteindelijke dataset.

Als het gaat om in-situ metingen, worden veel meetgegevens verzameld in meetcampagnes als onderdeel van wetenschappelijk onderzoek (bijvoorbeeld een PhD en/of postdoc gefinancierd via NWO) en wordt er voor een vooraf vastgestelde periode betaald voor de gehele meetopstelling, inclusief dataopslag. Na afloop van een dergelijk onderzoek wordt er vaak niet meer verder gemeten. Naast de meetcampagnes wordt er in toenemende mate gebruik gemaakt van satellietgegevens voor het inschatten van de referentie en/of actuele verdamping, waarmee gemiddeld gezien op dag basis voor een bepaald gebied gegevens binnengehaald kunnen worden. Dergelijke satellietproducten zijn voornamelijk beschikbaar op Europees niveau via bijvoorbeeld Copernicus, EUMETSAT en ESA of voor Nederland via het Waterschapshuis in de vorm van Satdata3.0. Als laatste zijn er de (hydrologische) modellen waarin vaak verschillende referentie verdamping methoden worden toegepast en die op basis van de modelvergelijken en andere forcering de verdamping schatten. Niet elke methode is geschikt onder alle omstandigheden. Het uitwisselen van ervaring ten aanzien van de toepasbaarheid van een methode voor een specifiek gebied is hierbij zeer belangrijk en samenwerking tussen de meteorologische en hydrologische wereld is onmisbaar.

Steeds vaker wordt onderzocht in hoeverre verdamping actief kan worden beïnvloed als onderdeel van klimaatadaptatie en zoetwaterbeheer. Mogelijke

maatregelen zijn onder andere aanpassing van vegetatiesamenstelling (bijvoorbeeld omvorming van naald- naar loofbos), inrichting van groenblauwe netwerken, peilbeheer en bodemmaatregelen die de waterbeschikbaarheid beïnvloeden. De effectiviteit van dergelijke maatregelen is echter sterk locatie- en seizoensafhankelijk en hangt af van de interactie tussen vegetatie, bodem, grondwater en atmosferische omstandigheden. Meer praktijkonderzoek is nodig om de effecten van deze maatregelen op de waterbalans en de beschikbaarheid van zoetwater beter te kwantificeren. Enkele voorbeelden zijn en projecten staan in Tabel 6.

Tabel 6. Maatregelen voor het sturen op verdamping en relevante beleidsprogramma's

Maatregel	**Doel**	**programma's / voorbeelden**
Omvorming van naald- naar loofbos	Verlaging van de jaarlijkse interceptie en verdamping, grotere grondwateraanvulling	Nationale Bossenstrategie; Probos – bosuitbreiding en ecosysteemdiensten
Vernatting van natuur en veengebieden	Vasthouden van water, beperken van verdroging en ondersteunen van natuur	Programma Natuur (Rijksoverheid); projecten van provincies en terreinbeheerders
Groenblauwe inrichting van stedelijk gebied	Vergroten van verkoeling via verdamping en beperken van hittestress	AMS instituut; Climate Adaptation Services (CAS)
Optimalisatie van openwaterbeheer	Betere schatting van openwaterverdamping voor peilbeheer en waterbeschikbaarheid	SWM-EVAP
Verbetering van verdampingsmonitoring	Betere operationele sturing met metingen, satellieten en modellen	Ruisdael Observatorium; ICOS Nederland
Water en Bodem Sturend	Landgebruik beter afstemmen op bodem- en watersysteem, inclusief de rol van verdamping	Water en Bodem Sturend (Rijksoverheid)

10. Kennisleemtes

Ondanks de vooruitgang die de afgelopen decennia is geboekt in het meten, modelleren en monitoren van verdamping bestaan nog belangrijke kennisleemtes. Voor het Nederlandse waterbeheer zijn met name de volgende onderwerpen relevant.

Partionering van verdamping

De verdeling van de totale verdamping over bodemverdamping, interceptieverdamping, openwaterverdamping en transpiratie is experimenteel en modelmatig nog moeilijk te bepalen (Miralles et al., 2016). Daardoor is vaak onduidelijk welke component verantwoordelijk is voor

veranderingen in de totale verdamping, waardoor waterbeheermaatregelen voor grondwaterbeheer, beregening, natuurbeheer en klimaatadaptatie minder gericht kunnen worden ingezet. Vooral in de landbouw is nog onvoldoende bekend hoeveel water gewassen daadwerkelijk gebruiken ten opzichte van hun optimale waterbehoefte (Droogers, 2009; Fisher et al., 2017). Betrouwbaardere meetmethoden en modellen zijn daarom nodig om de afzonderlijke verdampingscomponenten beter te bepalen.

Verdamping van open water

Openwaterverdamping kent een andere dynamiek dan verdamping boven land door de grotere warmtecapaciteit van water. Daardoor reageert de verdamping vertraagd op meteorologische omstandigheden en is de relatie met straling anders dan boven land. Toepassing van methoden die voor landoppervlakken zijn ontwikkeld kan leiden tot een onder- of overschatting van verdampingsverliezen uit meren, kanalen en reservoirs. Dit beïnvloedt waterbalansen, peilbeheer en de beschikbaarheid van zoetwater. Verdere ontwikkeling van operationele methoden is nodig om openwaterverdamping expliciet op te nemen in waterbeheerinstrumenten, zoals het LHM, NWM, FEWS en NHI.

Verdamping stedelijke gebied en groenblauwe maatregelen

Verdamping in stedelijke gebieden wijkt sterk af van die in natuurlijke en agrarische systemen door de combinatie van verharding, bebouwing, stedelijke vegetatie en lokale standplaatsfactoren (Swart et al., 2012; Grimmond et al., 2010; Oke et al., 2017; Damm et al., 2012). Voor Nederlandse omstandigheden is nog onvoldoende gekwantificeerd hoe stedelijk groen en groenblauwe maatregelen, zoals bomen, wadi's, groene daken, gevelgroen en stedelijk oppervlaktewater, de verdamping, droogtebestendigheid en regionale waterbalans beïnvloeden. Hierdoor kunnen waterbeheerders de extra watervraag van stedelijke vergroening nog onvoldoende meenemen in peilbeheer, zoetwaterverdeling en klimaatadaptatiestrategieën. Verdere ontwikkeling van meetmethoden en modellen is nodig om deze effecten beter te kwantificeren.

Verdamping en beregening

Tijdens beregening gaat een deel van het water verloren door interceptieverdamping, maar de omvang van deze verliezen onder Nederlandse omstandigheden is onvoldoende bekend. Ook is onduidelijk hoe groot de verschillen zijn tussen beregenen overdag en 's nachts en welke rol gewaskoeling hierbij speelt. Hierdoor is het lastig om beschikbare zoetwatervoorraden efficiënt te benutten en

beregeningsadviezen en vergunningverlening goed te onderbouwen. Praktijkmetingen onder verschillende weersomstandigheden en voor verschillende gewassen zijn nodig om deze verdampingsverliezen beter te kwantificeren.

Klimaatverandering, droogte en weersextremen

Klimaatverandering beïnvloedt zowel de referentieverdamping als de actuele verdamping. Waarnemingen laten zien dat de referentieverdamping in Nederland de afgelopen decennia is toegenomen, voornamelijk door een toename van de inkomende zonnestraling. Daarnaast begint het droogteseizoen steeds eerder, waardoor neerslagtekorten eerder kunnen ontstaan. Tegelijkertijd is nog onvoldoende bekend hoe de actuele verdamping van ecosystemen, landbouwgebieden, open wateren en stedelijke gebieden zal reageren op veranderingen in temperatuur, bodemvocht, vegetatie en atmosferische CO_2-concentraties. Ook regionale verschillen verdienen aandacht; de effecten van een toenemende verdampingsvraag zijn waarschijnlijk groter op de hoge zandgronden van Oost- en Zuid-Nederland dan in gebieden waar meer water beschikbaar blijft vanuit bodem en grondwater. Een belangrijke onderzoeksvraag is hoe verdamping reageert op langdurige droogte, hittegolven en andere (compound en cascade) weersextremen. Deze kennis is essentieel voor klimaatadaptatie, natuurbeheer, landbouw en het toekomstige beheer van de Nederlandse zoetwatervoorraad.

Datagedreven methoden en kunstmatige intelligentie

Machine learning en kunstmatige intelligentie bieden nieuwe mogelijkheden om verdamping te schatten met behulp van meteorologische gegevens, satellietwaarnemingen en hydrologische modellen (Chandel et al., 2023; Abbaszadeh et al., 2023). Tegelijkertijd is nog onvoldoende bekend hoe robuust deze methoden zijn onder extreme weersomstandigheden en in een veranderend klimaat. Voor operationeel waterbeheer zijn betrouwbare, uitlegbare en reproduceerbare modellen essentieel. Vervolgonderzoek moet zich daarom richten op hybride modellen waarin fysische proceskennis wordt gecombineerd met datagedreven methoden, aangevuld met validatie onder Nederlandse omstandigheden en tijdens extreme droogte- en natte perioden.

11. Bronnen en Links

Abbaszadeh et al. (2023). *A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-*

based data. Agricultural Water Management, 284, 108324.

Allan, Richard & Pereira, L. & Smith, Martin. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agricultural Water Management, 98, (6), 899-920.

AMS (2016). AAMS – Amsterdam Atmospheric Monitoring Supersite. https://www.ams-institute.org/urban-challenges/resilient-cities/amsterdam-atmospheric-monitoring-supersite/ (bezocht op: 17-09-2020).

Berge, H.F.M. ten (1990). Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere. Simulation monographs, 33. Pudoc, Wageningen.

Bessembinder, J., Bintanja, R., van Dorland, R., Homan, C., Overbeek, B., Selten, F. & Siegmund, P. (2023). *KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland*. KNMI-publicatie 23-03. De Bilt: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

Blyth, E.M. and C.M.J. Jacobs (2011). Developing a feedbacks toolkit for Regional water resource assessments. IAHS Publ. 344, 27-31.

Boerderij, (2019). Overzicht van bodemvochtsensoren, Akkerbouw, Achtergrond, 7 feb 2019, https://www.boerderij.nl/Akkerbouw/Achtergrond/2019/2/Overzicht-van-bodemvochtsensoren-389671E/ (bezocht op: 10-06-2020)

Bruin, H.A.R. de (1983). A model for the Priestley-Taylor parameter □. Journal of climate and applied meteorology, 22, 572-578.

Bruin, H.A.R. de (2017). Dagelijkse referentiegewasverdamping geschat uit satellietbeelden: van Makkink naar een nieuw EUMESAT LSA SAF product. Stromingen 29, nummer 3.

Bruin, H. A. R. de, & Lablans, W. N. (1998). Reference Crop Evapotranspiration Determined with a Modified Makkink Equation, Hydrol. Process., 12, 1053–1062, https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980615)12:7<1053::AID-HYP639>3.0.CO;2-E.

Bruin, H. A. R. de, & Stricker, J. N. M. (2000). Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. Hydrological sciences journal, 45(3), 391-406.

Bruin, H.A.R. de, & Trigo, I. (2019). A New Method to Estimate Reference Crop Evapotranspiration from Geostationary Satellite Imagery: Practical Considerations. Water, 11, 382.

Bruin, H.A.R. de, I.F. Trigo, F. C. Bosveld en J.F. Meirink (2016). A thermodynamically based model for actual evapotranspiration of an extensive grass field close to FAO reference, suitable for remote sensing application, J. of Hydromet., doi: 10.1175/ JHM-D-15-0006.1.

Caljé, R., F. Schaars, J. Heijkers, (2014). Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping. STOWA rapport 2014-18.

Chandel et al. (2023). *A review of the Artificial Intelligence (AI) based techniques for estimating reference evapotranspiration: Current trends and future perspectives.* Computers and Electronics in Agriculture, 209, 107836.

Damm, E., Höke, S. & Doetsch, P. (2012). Erfassung und Optimierungspotential der Kühlleistung von Böden, dargestellt an ausgewählten Flächen der Stadt Bottrop. Bodenschutz : Erhaltung, Nutzung und Wiederherstellung von Böden, 3, 94-98.

DeCosmo, J., Katsaros, K. B., Smith, S. D., Anderson, R. J., Oost, W. A., Bumke, K., & Chadwick, H. (1996). Air-sea exchange of water vapor and sensible heat: The Humidity Exchange Over the Sea (HEXOS) results. Journal of Geophysical Research, 101, 12001–12016.

DiGiovanni-White, K., Montalto, F. & Gaffin, S. (2018). A comparative analysis of micrometeorological determinants of evapotranspiration rates within a heterogeneous urban environment. Journal of Hydrology 562, 223-243.

Droogers P., 2009: Definitiestudie: Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer. STOWA rapport 2009-11, www.stowa.nl.

Elbers, J.A., E.J. Moors & C.M.J. Jacobs (2010). Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. Alterra rapport 1920, Deltares

Eertwegh, G. van den, J. van Bakel, H. Massop, J. van Dam, F. Bosveld en A. Veldhuizen, 2020. Efficiëntie van beregening. Een deskstudy naar kennis en inzicht ten aanzien van waterverliezen bij midden op de dag beregenen vergeleken met beregen in de nachtelijke uren. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Eindnotitie.

Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink's reference crop evapotranspiration. In Hooghart J.C, 1987. Evaporation and weather. Proceedings and information no. 39. CHO-TNO, Den Haag.

Feigenwinter, C., Vogt, R., & Christen, A. (2012). Eddy Covariance Measurements Over Urban Areas. In M. Aubinet, T. Vesala, & D. Papale (Eds.), Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis (pp. 377-397). Dordrecht: Springer Netherlands.

Fisher, J. B., et al. (2017), The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources, Water Resour.Res., 53, 2618–2626.

Gemeente Almelo (2022). Klimaatadaptatie-strategie Almelo 2021–2025: Samen kansen benutten. https://repository.officiele-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2022-32429/1/bijlage/exb-2022-32429.pdf

Graaf, R.E. de, Roeffen, B., Den Ouden, T. & Souwer, B. (2013). Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden. Deltasync BV, Delft.

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., . . . Zhang, N. (2010). The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. J. Appl. Meteorol. Clim., 49, 1268-1292.

Harding, R., Best, M., Blyth, E., Hagemann, S., Kabat, P., Tallaksen, L. M., . . . Haddeland, I. (2011). WATCH: Current Knowledge of the Terrestrial Global Water Cycle. Journal of Hydrometeorology, 12(6), 1149-1156.

Hartong, H. en P. Termes, (2009). Handboek Debietmeten in open waterlopen. STOWA rapport 2009-41.

Heerwaarden, C. C. van, J. Vilà-Guerau de Arellano, A. F. Moene & A. A. M. Holtslag, (2009). Interactions between dry-air entrainment, surface evaporation and convective boundary-layer development. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. , 135, 1277–1291.

Van Heerwaarden, C. C., J. Vila-Guerau de Arellano, and A. J. Teuling (2010). Land-atmosphere coupling explains the link between pan evaporation and actual evapotranspiration trendsin a changing climate, Geophys. Res. Lett., 37, L21401,doi:10.1029/2010GL045374

Het Waterschapshuis (2020). https://www.hetwaterschapshuis.nl/satdata-30/ (bezocht op: 08-06-2020)

ICOS (2020). Integrated Carbon Observation System. https://www.icos-cp.eu/ (bezocht op: 17-09-2020)

Jacobs, A. F. G., & De Bruin, H. A. R. (1998). Makkink's equation for evapotranspiration applied to unstressed maize. Hydrological processes, 12(7), 1063-1066.

Jacobs, A., Heusinkveld, B., & Holtslag, A. (2008). Towards Closing the Surface Energy Budget of a Mid-latitude Grassland. Boundary-Layer Meteorology, 126, 125-136.

Jacobs, C. M. J., & De Bruin, H. A. R. (1992). The sensitivity of regional transpiration to land-surface characteristics: Significance of feedback. Journal of Climate, 5(7), 683-698.

Jacobs, C.M.J., & H.A.R. de Bruin (1997). Predicting regional transpiration at elevated atmospheric CO2: influence of the PBL–vegetation interaction. Journal of applied meteorology, 36(12), 1663-1675.

Jacobs, C., Elbers, J., Brolsma, R., Hartogensis, O., Moors, E., Márquez, M. T. R. C., & van Hove, B. (2015). Assessment of evaporative water loss from Dutch cities. Building and Environment, 83, 27-38.

Jansen, F. A. and Teuling, A. J. (2020). Evaporation from a large lowland reservoir – (dis)agreement between evaporation models from hourly to decadal timescales, Hydrol. Earth Syst. Sci., 24, 1055–1072, https://doi.org/10.5194/hess-24-1055-2020

Jarvis P. G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Phil. Trans. R. Soc.Lond. B 273, 593–610. (doi:10.1098/rstb.1976.0035)

Jung, M., Koirala, S., Weber, U., Ichii, K., Gans, F., Camps-Valls, G., . . . Reichstein, M. (2019). The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes.

Scientific Data, 6(1), 74. doi:10.1038/s41597-019-0076-8

KNMI (2014). KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt. www.climatescenarios.nl

KNMI (2017). Onderzoek naar verdamping voor beter waterbeheer. https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/onderzoek-naar-verdamping-voor-beter-waterbeheer (bezocht op: 30-06-2020)

KNMI (2020a). Achtergrondinformatie neerslagtekort. https://knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/achtergrondinformatie-neerslagtekort (bezocht op: 17-09-2020).

KNMI (2020b). Verdamping in Nederland. https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/verdamping-in-nederland (bezocht op 17-09-2020).

KNMI (2023). Meer verdamping in Nederland, vooral door toename in zonnestraling. KNMI-klimaatbericht, 13 april 2023. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt. https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/meer-verdamping-in-nederland-vooral-door-toename-in-zonnestraling (bezocht op 2026-7-13)

KNMI (2024). Verdroging start steeds vroeger in het voorjaar. KNMI-klimaatbericht, 2 april 2024. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt. https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/verdroging-start-steeds-vroeger-in-het-seizoen (bezocht op 2026-7-13)

Kroes, J.G., J.C.. van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks & C.M.J. Jacobs. (2008). Swap version 3.2 : theory description and user manual. Alterra report 1649. Alterra, Wageningen.

Kruijt, B., J.P.M. Witte, C.M.J. Jacobs & T. Kroon (2008). Effects of rising atmospheric CO2 on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. Journal of Hydrology, 349(3-4), 257-267.

Martens, B., R.A.M. De Jeu, N.E.C. Verhoest, H. Schuurmans, J. Kleijer, and D.G. Miralles. (2018). Towards estimating land evaporation at field scales using GLEAM.

Remote Sensing, 10(11):1720, URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/11/1720, doi:10.3390/rs10111720.

McNaughton, K. G., & Spriggs, T. W. (1986). A mixed-layer model for regional evaporation. Boundary-Layer Meteorology, 34(3), 243-262.

Miralles, D. G., C. Jimenez, M. Jung, D. Michel, A. Ershadi, M. McCabe, M. Hirschi, B. Martens, A. Dolman, and J. Fisher (2016), The WACMOS-ET project, part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets, Hydrol. Earth Syst. Sci., 20(2), 823–842.

Moene, A.F. & J.C. van Dam (2014). Transport in the atmosphere-vegetation-soil continuum. Cambridge University Press, New York.

Monteith, J.L. (1965). Evaporation and the Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205-234.

Monteith, J.L. & M.H. Unsworth (2013). Principles of Environmental Physics (4th Ed.). Plants, Animals, and the Atmosphere. Academic Press, Amsterdam.

Moors, E.J., A.J. Dolman, W. Bouten en A.W.L. Veen (1996). De verdamping van bossen. H2O 29, 462-466.

Moors, E., W. van Ellen, J. Mol & B. Swart (2002). Hydrologische woordenlijst. NHV-special 5, Nederlandse Hydrologische Verenining (NHV).

Natuurmonumenten (2020). Meer inzicht in broeikasgassen uit natte natuur. https://www.natuurmonumenten.nl/nieuws/meer-inzicht-broeikasgassen-uit-natte-natuur (bezocht op: 17-09-2020)

NHI (2020). http://www.nhi.nu/nl/ (bezocht op: 15-6-2020)

NHV-Werkgroep Verdamping, (2015). Verdamping in de hydrologie. NHV-Special 8, Nederlandse Hydrologische Vereniging (NHV).

Nouri, H., Beecham, S., Hassanli, A. M., & Kazemi, F. (2013). Water requirements of urban landscape plants: A comparison of three factor-based approaches. Ecological Engineering, 57, 276-284.

Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., & Hassanli, A. M. (2012). A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. Urban Water J., 10, 247-259.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A. (2017). Urban Climates, Cambridge University Press, Cambridge.

Oost, W.A., Jacobs, C.M.J., & Van Oort, C. (2000). Stability effects on heat and moisture fluxes at sea. Boundary-Layer Meteorology, 95, 271-302.

Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass, P. Roy. Soc. Lond. A, 193, 120–145.

Roderick, M. L., and G. D. Farquhar (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years, Science, 298, 1410–1411

Ruisdael Observatory (2020). Ruisdael Observatory: top research facility for weather and climate. https://ruisdael-observatory.nl/about/ (bezocht op: 17-09-2020)

Schilperoort, B., Coenders-Gerrits, M., Luxemburg, W., Rodríguez, C. J., Vaca, C. C., & Savenije, H. (2018). Using distributed temperature sensing for Bowen ratio evaporation measurements. Hydrology and earth system sciences, 22(1), 819.

Shuttleworth, W. J., & Calder, I. R. (1979). Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation?. Journal of Applied Meteorology, 18(5), 639-646.

Shuttleworth, W.J. (2012). Terrestrial Hydrometeorology. Wiley & Sons, West Sussex.

Solcerova, A., van de Ven, F., & Van De Giesen, N. (2019). Nighttime cooling of an urban pond. Frontiers in earth science, 7, 156.

STOWA (2023). *Droogtestatistiek. Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer. Deelrapport 3*. STOWA-rapport 2023-36, Amersfoort.

Sumner, D. M., & Jacobs, C. M. (2016). Urban evapotranspiration in a humid environment-Orlando, Florida, USA. In Fifth Interagency Conference on Research in the Watersheds, March 2-5, 2015, North Charleston (p. 246). US Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.

Swart, R., J. Fons, W. Geertsema, B. van Hove, M. Gregor, M. Havranek, C. Jacobs, A. Kazmierczak, K., C. Kuhlicke, & L. Peltonen (2012). Urban Vulnerability Indicators. A joint report of ETC-CCA and ETC-SIA. ETC-CCA and ETC-SIA Technical Report 01/2012

Teuling, A. J., et al. (2009). A regional perspective on trends in continental evaporation, Geophys. Res. Lett., 36, L02404, doi:10.1029 / 2008GL036584

Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Stöckli, R., Reichstein, M., Moors, E., Ciais, P., ... & Dellwik, E. (2010). Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. Nature Geoscience, 3(10), 722-727.

Teuling, A. J., de Badts, E. A. G., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., Hoek van Dijke, A. J., and Sterling, S. M. (2019). Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe, Hydrol. Earth Syst. Sci., 23, 3631–3652, https://doi.org/10.5194/hess-23-3631-2019

Verhoef, A., & Egea, G. (2014). Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. Agricultural and Forest Meteorology, 191, 22-32.

Viergever, K., H. Pelgrum, M. Voogt, (2017). Methodiek SAT-DATA 2.0; Satelliet gebaseerde verdampingsdata voor Nederland. Eleaf BV, Wageningen. http://85.214.197.176/meteobase/downloads/fixed/literatuur/20171101_Methodiek%20SAT-DATA_eLEAF_v4.pdf

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. & López-Moreno, J.I. (2010). *A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*. Journal

of Climate, 23(7), 1696–1718.

Waterschap Vechtstromen, Land-iD & KnowH2O (2024). Verkenning Klimaatrobuuster Vechtstroomgebied. Januari 2024. https://q-hydrology.co.nz/wp-content/uploads/2024/02/240131-Definitief-Rapport-klimaatbestendig-Vechtstroomgebied.pdf

Vilà-Guerau de Arellano, J., C.C. van Heerwaarden, B.J.H. van Stratum & K. van den Dries (2015). Atmospheric Boundary Layer. Integrating Air Chemistry and Land Interactions. Cambridge University Press, New York.

Voogt, W., F. Zwinkels, J. Balendonck, H. van Dorland, A. van Winkel, M. Heinen, (2012). Ontwikkeling emissiemanagementsysteem grondgebonden teelt; de lysimeter en drainmeter. Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Witte, J.-P. M., Zaadnoordijk, W. J., & Buyse, J. J. (2019). Forensic Hydrology Reveals Why Groundwater Tables in The Province of Noord Brabant (The Netherlands) Dropped More Than Expected. Water, 11, 478.