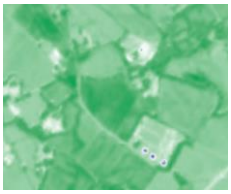
Efficiëntie van beregening

Een deskstudy naar kennis en inzicht ten aanzien van waterverliezen bij midden op de dag beregenen vergeleken met beregen in de nachtelijke uren



Projectteam

Gé van den Eertwegh, Jan van Bakel, Harry Massop, Jos van Dam, Fred Bosveld en Ab Veldhuizen

Eindnotitie - 31 augustus 2020

Uitgevoerd in opdracht van:

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

Inhoudsopgave

Samenvatting **3**

1 Inleiding **5**

1.1. Droog weer en watervoorziening landbouw *5*

1.2. Probleemstelling, vragen en doelstelling *6*

1.3. Deskstudy *6*

2 Kennis uit literatuur en ervaring met beregeningsverliezen **7**

2.1. Inleiding *7*

2.2. Literatuuronderzoek *8*

2.3 Conclusies uit het literatuuronderzoek *14*

3 Expertkennis en kennis uit literatuur toegepast op Nederlandse beregeningspraktijk **15**

3.1. Formules uit de literatuur *15*

3.2. Gebruikte meteodata *15*

3.3. Resultaten *15*

4 Interpretatie rekenresultaten en discussie **17**

5 Conclusies en aanbevelingen **18**

5.1. Wat weten we *18*

5.2. Nader onderzoek *18*

6 Referenties **19**

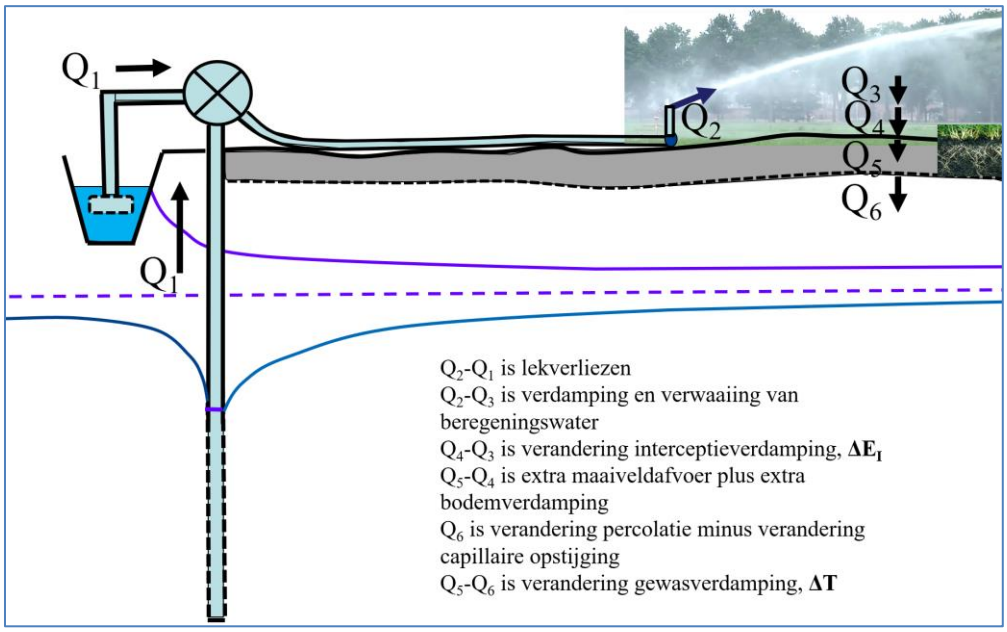
7 Bijlagen **22**

7.1. Samenvatting van recente aanvullende internationale literatuur *22*

7.2. Verdampings- en driftverliezen bij beregening *26*

Samenvatting

Beregening in en door de landbouwsector is ter watervoorziening van gewassen die anders bij droog weer (teveel) droogteschade ondervinden door een droge wortelzone. Beregening kan plaatsvinden via het onttrekken van water aan oppervlaktewater en/of grondwater. De efficiëntie van beregening, uitgedrukt als het percentage (%) van het volume beregeningswater dat ten goede komt aan de werkelijke gewasverdamping, hangt af van de verliezen die optreden (Figuur S.1). Windsnelheid en -richting liggen ten grondslag aan drift- en percolatieverliezen.



Figuur S.1: Beregeningsverliezen in beeld gebracht.

Op basis van literatuuronderzoek, berekeningen voor Nederlandse omstandigheden en rekening houdend met de karakteristieken van een spuithaspel komen we tot de volgende bevindingen. De drie meest relevante verliesposten zijn qua grootte als percentage van de totale beregeningsgift op dagbasis als volgt:

- verdampingsverliezen: 2 à 4%;
- driftverliezen: 5 à >10%;
- percolatieverliezen: 5 à >15%.

Daarmee heeft met name de windsnelheid en deels ook de windrichting absoluut gezien een duidelijk grotere invloed op de waterverliezen tijdens beregening dan verdamping. Verdampingsverliezen zijn gering.

Als we voor het groeiseizoen van gewassen (april-september) beregening gedurende de dag en de nacht beschouwen, dan is het grootste verschil in verliezen tussen overdag en 's nachts toe te schrijven aan verdamping en aan wind. Grofweg gesteld: overdag verdampt er meer en 's nachts waait het doorgaans minder hard. We komen op basis van deze studie tot de volgende conclusies:

- beregening overdag levert weliswaar grotere verdampingsverliezen (3 à 6% van de beregeningsgift op dagbasis) op in vergelijking met beregening 's nachts (2 à 3% van de beregeningsgift op dagbasis), maar dit is een zeer gering verschil. Een verbod op beregening overdag is weinig effectief om de verdampingsverliezen significant terug te brengen;
- drift door wind tijdens beregening heeft een groter effect op de beregeningsverliezen dan verdamping tijdens beregening. Omdat het overdag gemiddeld harder waait zijn de driftverliezen bij beregenen overdag 1 à 3% groter ten opzichte van beregenen 's nachts in West-Nederland; deze %-verschillen zijn kleiner in Oost- en Zuid-Nederland;

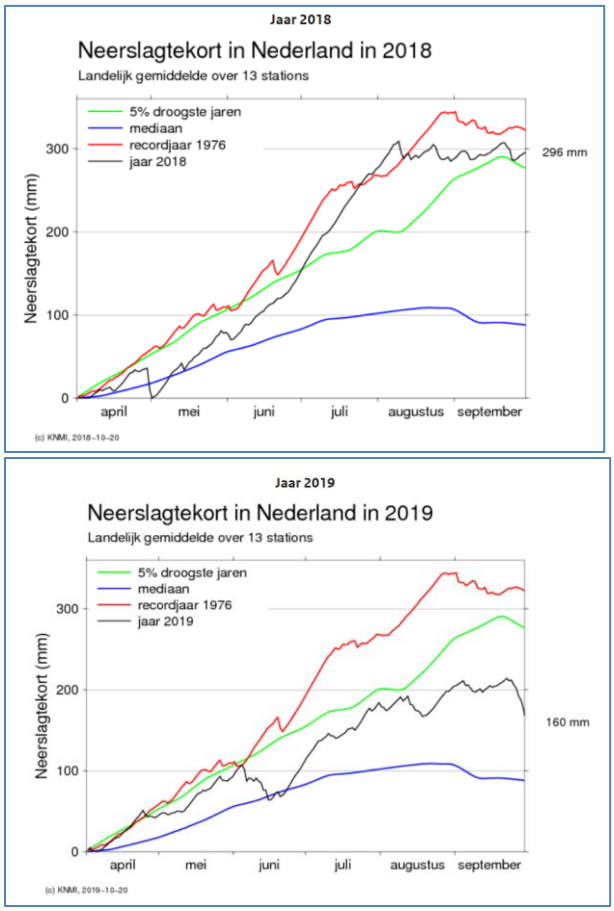
- percolatieverliezen worden groter naarmate het harder waait (geen schattingen/cijfers bekend of bepaald); deze verliezen zijn overdag groter dan 's nachts;
- niet beregenen bij windsnelheden boven 3 m/s (matige wind) is daarmee effectief om verliezen te beperken, omdat daarmee zowel de driftverliezen als de percolatieverliezen worden gereduceerd. In de praktijk wordt bij voorkeur niet beregend als het 'hard' waait.

Nadere onderbouwing van deze bevindingen door middel van (veld)metingen aan verliezen bij gebruik van een spuithaspel is gewenst. Zo krijgen we een beter en meer binnen het Nederlandse klimaat geldende onderbouwing, want beregenen met de spuithaspel is windgevoelig.

1 Inleiding

1.1. Droog weer en watervoorziening landbouw

De groeiseizoenen van 2018 en 2019 waren droog tot extreem droog. Onderstaande figuren geven dit duidelijk weer. Ten tijde van deze rapportage ontwikkelde ook het groeiseizoen van 2020 zich van droog tot zeer droog.



Figuur 1: Verloop van het neerslagtekort vanaf 1 april in de zomerhalfjaren van 2018 en 2019.

Zonder aanvullende watervoorziening hebben gras en akkerbouwgewassen te lijden gehad van droogteschade in 2018 en 2019, in 2020 waarschijnlijk ook. De meest voorkomende vorm van aanvullende watervoorziening door de landbouw is beregening met grondwater of oppervlaktewater. Druppelirrigatie en sub-irrigatie via drainagebuizen vinden ook plaats.

In sommige provincies zijn of waren beperkingen van de beregening van landbouwgewassen van kracht. Dit kan gaan om zowel (tijdelijke) beregeningsverboden uit grondwater als uit oppervlaktewater. Een in het oog springende beperking is een mogelijk verbod voor beregenen overdag, tussen 11 en 17 uur zomertijd, het zogenaamde 'urenverbod'. De ratio daarachter is dat wordt aangenomen dat er overdag meer beregeningswater verdampt dan 's nachts, voordat het water de plantenwortels in de bodem bereikt. Daardoor neemt de beregeningsefficiëntie af, uitgedrukt als het percentage van het beregeningswater dat ten goede komt aan de gewasverdamping. Om toch in dezelfde mate aan de waterbehoefte van de plant te voldoen, moet er dus meer beregend worden. Dat is in strijd met het streven van waterschappen en provincies de wateronttrekkingen aan oppervlakte- en grondwater en de beregeningshoeveelheden zo laag mogelijk te houden, omdat er onvoldoende water beschikbaar is om alle vragende functies voldoende te bedienen.

Voor agrariërs kan het niet kunnen beregenen overdag er toe leiden dat beregenen wordt verdrongen naar de randen van de dag en naar de nacht. Dat is om twee redenen niet gewenst:

1. Het gaat ten koste van de avond- en nachtrust van boeren. Door allerlei technische ontwikkelingen kan een haspelinstallatie echter uren achtereen beregenen zonder tussenkomst van de boer, dus op dit bezwaar valt anno nu wel wat op af te dingen.
2. De beregeningscapaciteit, uitgedrukt als het aantal ha's dat een installatie per dag kan worden beregend, wordt minder. Hierdoor kunnen minder ha's worden beregend met dezelfde installatie, dan wel er zijn meer installaties nodig om hetzelfde areaal te kunnen beregenen.

De aanname dat een beregeningsverbod voor overdag leidt tot substantieel hogere beregeningsefficiëntie staat echter ter discussie. Het is dus zaak zo objectief mogelijk vast te stellen hoeveel de beregeningsefficiëntie overdag anders is dan tijdens beregening in de nacht.

1.2. Probleemstelling, vragen en doelstelling

Bij het beregenen van landbouwgewassen in de vollegrond komt niet al het toegediende water ten goede aan de toename van de verdamping van de beregende gewassen. Hiervoor zijn diverse waterverliezen verantwoordelijk. Een deel van het uit grondwater- of oppervlaktewater onttrokken water verdampt voordat het op het gewas of op de grond belandt. Dit verdampingsverlies wordt als ongewenst beschouwd. De veronderstelling is dat dit verlies groter is bij beregenen overdag dan 's nachts en dat een eventueel verschil op het totaal aan verliezen een duidelijk aandeel heeft.

De vraag is of een verbod op overdag beregenen zinvol is uit het oogpunt van waterbesparing i.c. de efficiëntie van beregening door minimale waterverliezen via verdamping en zo ja, wat dan de effectiefste uren zijn voor zo'n verbod.

Doel van deze notitie is op basis van een beperkt literatuuronderzoek en enige berekeningen voor de Nederlandse situatie de volgende zaken te belichten:

- welke waterverliezen treden in principe op bij beregening?
- welke factoren beïnvloeden de omvang van de verliezen?
- welke waterverliezen zijn verschillend als we de dag of de nacht beschouwen?
- wat is de relatie tussen de omvang van de waterverliezen en het uur van de dag dat er wordt beregend i.c. tijdens beregening overdag of 's nachts?

1.3. Deskstudy

Deze rapportage is tot stand gekomen in juli-augustus 2020 als deskstudy naar de stand van kennis en inzicht in waterverliezen bij de beregening van landbouwgewassen. De vraag in de vorige paragraaf is gesteld tijdens een Sectoroverleg Droogte van het Ministerie van LNV (opdrachtgever van studie) in juni 2020. De auteurs hebben in beperkte tijd hun eigen kennis en bestaande literatuur gebruikt, naast een reken-exercitie met buitenlandse formules en binnenlands klimaat, om een beeld te schetsen van de mogelijke verliezen bij beregening en van de verschillen hierin tussen overdag en 's nachts beregenen.

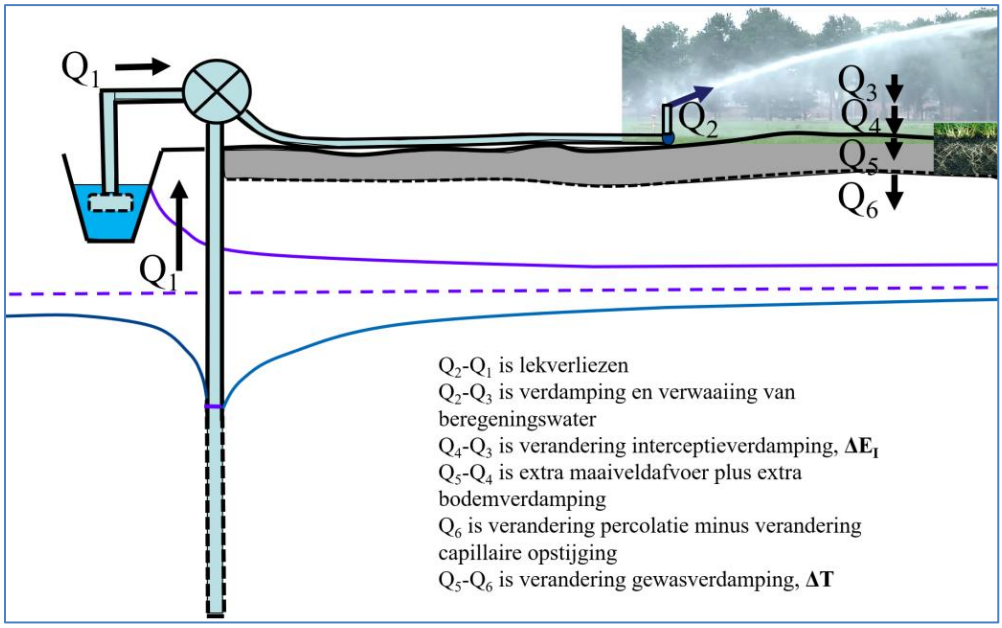
2 Kennis uit literatuur en ervaring met beregeningsverliezen

2.1. Inleiding

Bij beregening komt niet al het uit het grondwater- of oppervlaktewatersysteem onttrokken water ten goede aan de aanvulling van het bodemvocht in de wortelzone van het beregende perceel. Er treden verliezen op die in de regel, zo ook in dit document, worden uitgedrukt als percentage van de verpompte hoeveelheid beregeningswater. Hoe hoger dit percentage is, des te lager de beregeningsefficiëntie wordt, uitgedrukt als percentage van het beregeningswater dat ten goede komt aan de werkelijke verdamping van het beregende gewas. Daarnaast wordt getracht de beregeningsefficiëntie te verhogen door de beregening af te stemmen op de actuele vochttoestand in de wortelzone en de weersverwachting. Laatstgenoemde onderwerpen komen in deze notitie niet aan de orde. Voor meer achtergronden wordt verwezen naar de Factsheet '**Beregening uit grondwater'** (Deltares/RIVM, 2014) en het Deltafact '**Bodemvocht gestuurd beregenen**' (STOWA, 2017).

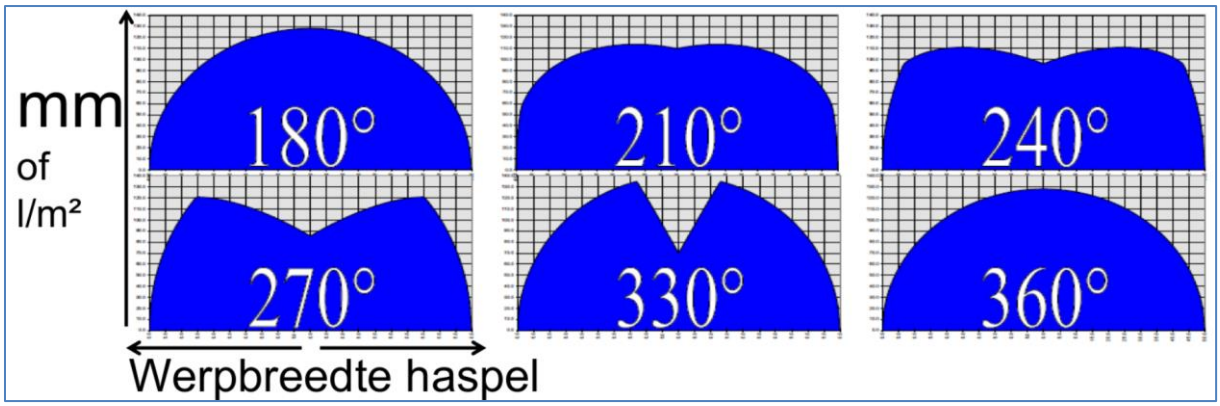
Tijdens beregening kunnen verliezen optreden (Figuur 2). De verliezen zijn af te leiden uit de verandering in volumestromen van het opgepompte beregeningswater:

- lekverliezen;
- verdampingsverliezen: verdamping van water op de weg van spuitmond naar gewas of bodemoppervlak van het beregende perceel;
- driftverliezen: door wind kan het toegediende water deels buiten het beregende perceel terecht komen;
- interceptieverdampingverliezen: een deel van het beregeningswater wordt onderschept door de vegetatie en verdampt als de beregening is gestopt;
- bodemverdampingverliezen: als beregeningswater direct het grondoppervlak bereikt, dan kan verdamping van water vanuit de bodem optreden;
- percolatieverliezen: door een niet-uniforme verdeling van de beregening kunnen plekken in het perceel meer of minder krijgen dan de gemiddelde gift die is bedoeld om de wortelzone op veldcapaciteit te brengen. Het teveel aan water percoleert naar de ondergrond en kan voor de boer als verlies worden aangemerkt. Ook door maaiveldafvoer kan beregeningswater naar lage plekken stromen waardoor de uniformiteit verder afneemt. Tenslotte kan door beregeningswater via verticale scheuren en preferente stroombanen naar de ondergrond percoleren. Daar staat tegenover dat via herverdeling van water in de onverzadigde zone de uniformiteit weer toeneemt en dat capillaire opstijging kan optreden. Daarmee zijn percolatieverliezen veelal voor minder dan 100% te beschouwen als verliezen.



Figuur 2: Beregeningsverliezen schematisch in beeld gebracht.

In de volgende sectie zullen de resultaten van een beperkte literatuurstudie worden beschreven waarbij het *Leitmotiv* is: zijn de beregeningsverliezen tussen pakweg 11 en 17 uur zomertijd groter dan buiten die uren? Daarbij is de moderne spuithaspel als uitgangspunt genomen. Deze voorbeeldhaspel heeft de volgende kenmerken: pompcapaciteit 50 m^3/uur, effectieve spuitbreedte 80 m, werkdruk 8 bar, spuitmonddiameter 25 mm en haspelsnelheid 25 m/uur. De sproeier draait niet rond maar pendelt en bestrijkt een sector met sectorhoek van 240 graden om een meer uniforme verdeling te bewerkstelligen. Zie onderstaande figuur.



Figuur 3: Schematische voorstelling van verdeling van beregeningsgift bij verschillende instellingen van de sproeier (uit Vaerten et al., 2019).

De voorbeeldgewassen voor beregening zijn gras, mais en consumptieaardappelen die worden beregend in de maanden mei t/m september (gras) resp. juli en augustus (mais en aardappelen).

In het WEcR-rapport van Van der Meer (2020) staat dat op nationale schaal de grootste hoeveelheid water voor beregening in 2017 en 2018 is gebruikt door de melkveehouderij (gras, mais) bij gebruik van een spuithaspel. Daarmee zijn de gewassen gras en mais en de spuithaspel als irrigatie-techniek belangrijk in de analyse. We concentreren ons derhalve op het gebruik van de spuithaspel op grasland.

2.2. Literatuuronderzoek

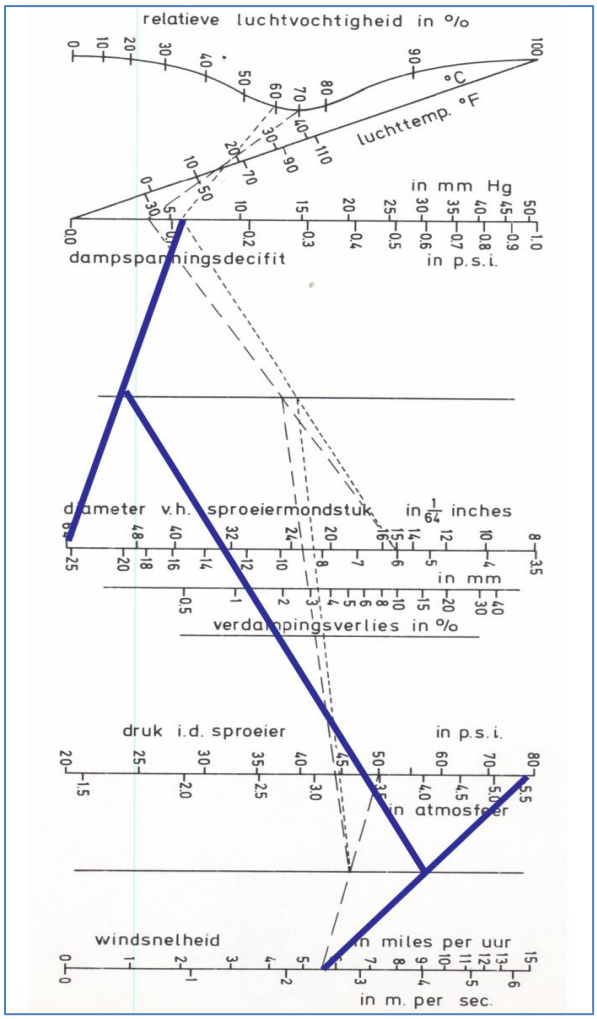
Lekverliezen

Bij de moderne spuithaspel zijn de lekverliezen gering en zijn minder dan 2% van de beregeningsgift. Er is bovendien geen relatie met het uur van de dag waarop wordt beregend.

Verdampingsverliezen

Indien bekend is wat de temperatuur is van het beregeningswater bij de spuitmond, hoe groot de druppels zijn (de verdeling) en hoelang ze in de lucht verblijven is te berekenen hoeveel water er verdampt als functie van het dampdrukdeficit (relatieve luchtvochtigheid) van de langs strijkende lucht en de windsnelheid. Zie o.a. **Hancock** (2014) en **Bruse** (2017). **Zazueta** (2018) geeft een generiek overzicht.

Er zijn veel studies waarin de verdampingsverliezen in het veld zijn gemeten door hetzij het water op te vangen in regenmeters hetzij de indikking te meten m.b.v. EC-metingen. Door **Frost and Schwalen** (1955) zijn de resultaten samengevat in een nomogram. Dit is door **Baars** (1971) gebruikt om de verdampingsverliezen van 'zijn' systeem te bepalen. Toegepast op 'onze' spuithaspel geeft dat voor beregening op een warme en droge zomermiddag (15.00 uur zomertijd) ca. 1% verliezen, zonder rekening te houden met de temperatuur van het beregeningswater. Zie onderstaande figuur 4.



Figuur 4: Toepassing van het nomogram van Frost en Schwalen (1955) op de maximale verdampingsverliezen bij gebruik van de spuithaspel (blauwe lijnen); de stippellijnen zijn van het voorbeeld van Baars, 1971. Mede gebaseerd op veldgegevens.

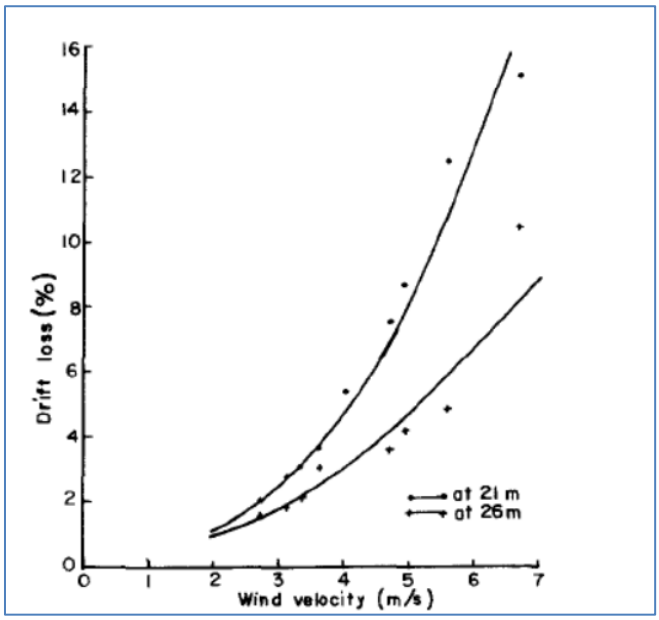
De temperatuur van het beregeningswater speelt een rol: als relatief koud grondwater wordt gebruikt, dan kan er zelfs water na het verlaten van de spuithaspel condenseren. Dit leidt dan tot een hogere gift (negatief verlies). In de nachtelijke uren is het dampdrukdeficit meestal geringer en de windsnelheid meestal lager dan overdag. Dus de verdampingsverliezen zijn dan geringer dan 1%.

Deze uitkomst is overigens niet verrassend. Reeds in 1992 schreef Hiemstra in de Boerderij (77, no.41, 7 juli 1992), in reactie op een uitspraak van een medewerker van een waterschap dat door 's nachts te beregenen wel 60% water kan worden bespaard: "*Het zou waterschappen en provincies sieren als ze zich dergelijke sommetjes laten voorrekenen vóór ze regels maken, die alleen tot gevolg hebben dat de boeren in hun gebied niet meer aan hun slaap toe komen. Meteorologische kennis toepassen bij het waterbeheer zou een zeer nuttige kruisbestuiving zijn van twee vakgebieden".*

Driftverliezen

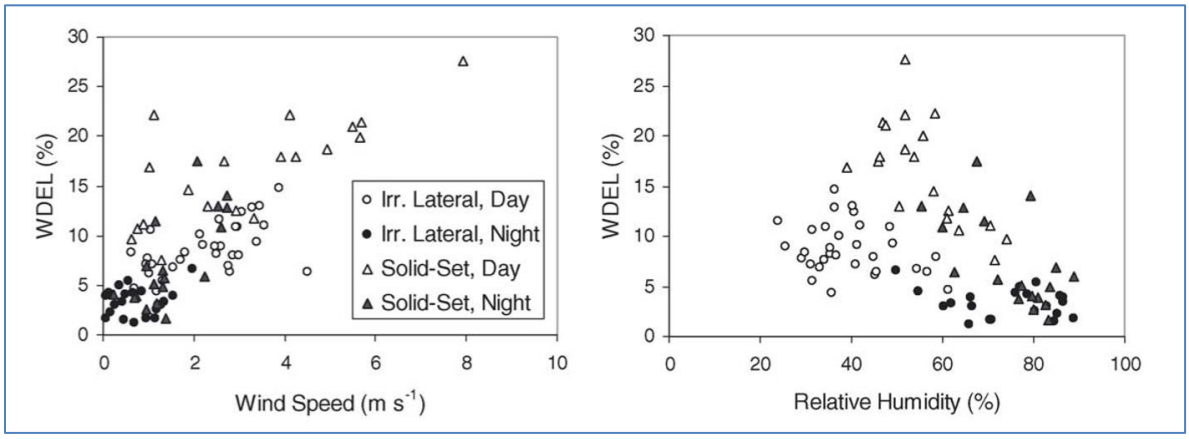
Driftverliezen zijn te relateren aan de wind, waardoor beregeningswater niet het beoogde gewasperceel bereikt. Snelheid en richting van de wind bepalen met de onregelmatigheid van het windveld de driftverliezen voor het beoogde perceel en gewas. De literatuur over driftverliezen is veel beperkter dan over verdampingsverliezen en gaat veelal over systemen met een vaste sproeieropstelling of over linear en central pivot systemen, waarbij de spuitbreedte per sproeier en hoogte van de spuitboog geringer is dan bij de spuithaspel.

Yazar (1984) vond in zijn experimenten een min of meer kwadratisch verband tussen windsnelheid op 2 m hoogte en driftverliezen. Zie onderstaande figuur 5:



Figuur 5: Relatie tussen driftverliezen en windsnelheiden driftverliezen op verschillende afstand van de horizontale beregeningsboom ofwel 'linear pivot' (ontleend aan Yazar, 1984).

In de meeste studies worden de verdampings- en driftverliezen bij elkaar genomen, aangeduid als Wind Drift and Evaporation Losses (WDEL). In **Playan et al.** (2005) is in Figuur 6 de WDEL als percentage uitgezet tegen windsnelheid en relatieve luchtvochtigheid, opgesplitst naar dag en nacht.



Figuur 6: WDEL bij dag overdag en 's nachts beregenen, als functie van windsnelheid en relatieve luchtvochtigheid (ontleend aan Playan et al., 2005).

Als we veronderstellen dat de verdampingsverliezen relatief gering zijn is de WDEL vooral te relateren aan de driftverliezen en dus aan de windsnelheid. Aangezien het 's nachts in de regel minder hard waait heeft een verbod op beregening overdag bij deze klimaatomstandigheden (Zaragoza, Spanje) een reductie van WDEL van ca. 6% tot resultaat. De driftgevoeligheid van spuithaspels is zeker groter dan van de beregeningssystemen gebruikt bij dit experiment (vaste opstelling en linear pivot).

Tarjuelo et al. (2000) geven de volgende relatie voor WDEL:

$WDEL = aP + b*(VPD)^{0,5} + cU + e$

waarbij P werkdruk (kPa), VPD is dampdrukdeficit (kPa), U is windsnelheid (m/s) en e is experimentele fout.

Als we wederom veronderstellen dat de verdampingsverliezen gering zijn is WDEL min of meer evenredig met de windsnelheid.

Sadeghi et al. (2017) leiden op basis van metingen afvoermetingen van strippen die het beregeningswater opvingen, voor een linear pivot installatie de volgende schattingsformule af tussen de *sprinkler discharge efficiency* (is 100 – WDEL) en 3 meteorologische variabelen:

$SDE_{hr} = 0,90855 = (1,5923 \times 10^{-4})RH - (1,22 \times 10^{-3})T - (4,89 \times 10^{-3})WS$

waarin RH is relatieve luchtvochtigheid (%), T is temperatuur (°C) en WS is windsnelheid (m/s).

Merk op dat de aldus berekende SDE (resp. WDEL), in tegenstelling tot Yazar, een lineair verband heeft met de windsnelheid.

Kolhoff (2020) heeft de resultaten van haar literatuurstudie naar verdampings- en driftverliezen samengevat in tabel 1. Opvallend is de grote spreiding. Het is dus niet goed mogelijk een typerende waarde te geven.

De resultaten uit de literatuur over verdampings- en driftverliezen zijn bovendien veelal niet goed toepasbaar op de spuithaspel en de Nederlandse klimaatomstandigheden. Beregening met de spuithaspel is windgevoelig. Hoe hoger de windsnelheid hoe meer er buiten het perceel terecht kan komen (voor de boer te kenschetsen als een echt verlies). Het percentage hangt af van grootte van het beregende perceel en de windsnelheid en -richting ten opzichte van rijrichting van de haspel. Als we, in navolging van Yazar (1984), uitgaan van een niet-lineair verband tussen windsnelheid en driftverliezen, is het niet beregenen bij windsnelheden boven 3 m/s een effectieve manier de driftverliezen te beperken. In de praktijk wordt deze regel ook gehanteerd (mondelinge meded. J. Coppens van bedrijf Smits, Veldhoven).

Op basis van eigen berekeningen van waterverliezen ten gevolge van wind met Nederlandse weergegevens (uur-data van metingen op automatische weerstations, AWS) voor West-Nederland (KNMI AWS Schiphol) en Oost- (KNMI AWS Twente) en Zuid-Nederland (KNMI AWS Volkel) blijkt dat er 's nachts kleinere verliezen optreden dan overdag. Voor West-Nederland zijn de verschillen in driftverliezen tussen overdag en 's nachts zo'n 1,5 à 3%, afhankelijk van de afstand buiten de beregeningscirkel van de haspel. De verschillen tussen de verliezen overdag en 's nachts zijn voor Oost- en Zuid-Nederland kleiner dan voor West-Nederland (zie bijlage 7.2).

Tabel 1. Verwaaiing en evaporatieverliezen tijdens spuithaspel irrigatie (uit Kolhoff, 2020).

Author	Location	Wind drift loss (%)	Spray evaporation loss (%)	Combined loss (%)
Abo-Ghobar (1992)	Saudi Arabia			15.6 – 35.8
Bavi et al. (2009)	Iran			4.4 – 8.9
Christiansen (1942)	California, USA			10 - 42
Clark and Finley (1975)	Southern Plains, USA			15
George (1957)	California, USA		2 - 15	
Frost and Schwalen (1955)	Florida, USA			35-45
Kincaid et al. (1986)	USA			5-12
Kohl et al. (1987)	South Dakota, USA		0.4 – 1.6	
Kraus (1966)	California, USA			3.4 – 17
Lorenzini (2002)	Italy		4.15 – 7.73	
Innoue (1963)	Japan	0.4 – 5.2		
McLean et al. (2000)	Canada		4-6	
Molle et al. (2012)	France		10.3	
Playan et al. (2005)	Spain			15.4
Steiner et al. (1983)	Kansas, USA			15
Thompson et al. (2010)	Modelling study		<1%	
Yazar (1984)	Nebraska, USA	1.5 - 15.1	1.5 – 16.8	1.7 – 30.7

Interceptieverdampingsverliezen

De interceptie van water door het gewas hangt af van de bladoppervlakte-index en varieert voor gras, maïs en aardappelen tussen 0,5 en 2,5 mm. Bij een beregeningsgift van 25 mm gaat het dus om 2 tot 10%. Dit interceptiewater verdampt geleidelijk, terwijl de huidmondjes open staan en de fotosynthese doorgaat. De verdamping van interceptiewater vermindert de transpiratiebehoefte van gewassen met een hoeveelheid grofweg gelijk aan de hoeveelheid interceptiewater. Daarom vermindert interceptie van beregeningswater de beregeningsefficiëntie niet, of maar voor een beperkt deel. De verdamping van interceptiewater komt dus (deels) ten goede aan de transpiratiebehoefte van het gewas en koelt daarnaast onder andere het gewasoppervlak af. Zie o.a. Bastiaanssen et al. (2012), Kroes et al. (2017), Monteith (1965) en Rijtema (1965). Daarmee beschouwen we de interceptieverdampingsverliezen als zeer gering en verwaarloosbaar.

Bodemverdampingsverliezen

De beschouwde gewassen gras, mais en aardappelen worden alleen beregend bij vrijwel volledige bodembedekking. Bovendien vermindert de bodemverdamping de transpiratiebehoefte. Derhalve kan de bodemverdamping van beregeningswater als verliespost worden verwaarloosd.

Percolatieverliezen

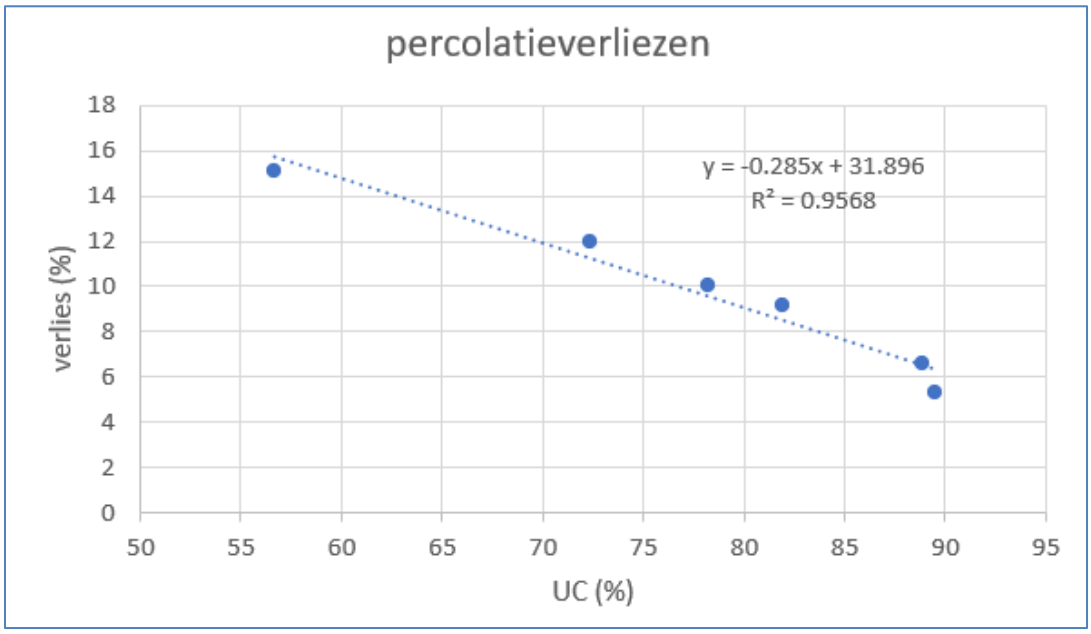
Hoe hoger de windsnelheid tijdens het beregenen, des te minder uniform de verdeling van de beregeningsgift binnen het beregende perceel wordt. Het beregeningswater bereikt het beoogde gewasperceel wel.

Indien alleen over-irrigatie (gift groter dan de gemiddelde gift) als percolatieverlies wordt gedefinieerd kan met behulp van de uniformiteitsindex UC van Christiansen **(Christiansen,** 1942) worden bepaald wat de percolatieverliezen zijn. De UC is gedefinieerd als

$$UC = 100 * (1{,}0 - \Sigma|x_i - x_{gem}|/(n * x_{gem}))$$

waarbij x_i is beregeningshoeveelheid in regenmeter i (mm), n is aantal regenmeters uniform verdeeld over beregend oppervlak en x_{gem} is gemiddelde beregeningsgift (mm).

Als we aannemen dat de hoogte van de beregeningsgift binnen het beregende perceel uniform maar wel willekeurig verdeeld is over een bandbreedte rond de gemiddelde gift kan de relatie worden bepaald tussen de bandbreedte en de daarvan afgeleide UC enerzijds en de percolatieverliezen anderzijds zoals weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Uit numerieke 'random' experimenten afgeleide relatie tussen de UC en percolatieverliezen.

Een UC van 90% wordt als goed beschouwd (**Vaerten et al.** ,2019) en geldt bij windstil weer. Het bijbehorende percolatieverlies is dan 5%. Volgens Wiersma (1955) neemt de UC af met 4% per 1 m/s toename van de windsnelheid. In een experiment naar relevantie van het tijdstip van irrigatie voor alfalfa-opbrengst van alfalfa (**Cavero et al**.,2016) nam de UC bij overdag beregenen af met 4%.

Deze bovenstaande bevindingen gelden voor sproeiers in een vaste opstelling. Aangenomen kan worden dat de gevoeligheid bij spuithaspels groter is, stel een factor 1,5 maal zo groot. Dan is de UC bij 3 m/s ca. 70%. De percolatieverliezen nemen daardoor toe van ongeveer 6% naar 12%. Gaan we uit van een kwadratisch verband tussen windsnelheid en afname van de UC, dan vindt de afname van de UC vooral bij windsnelheden >3 m/s plaats (matige wind).

Bij een lage waarde van de UC zijn er veel plekken waar aanmerkelijk minder beregeningswater terecht komt dan beoogd. Dit is eveneens een ongewenst effect van beregenen bij hogere windsnelheden. In de praktijk zal er daarom bij voorkeur niet worden beregend boven een windsnelheid gemiddeld over een uur van 3 m/s.

Percolatieverliezen volledig als verlies te beschouwen is overigens een *'worst case'* benadering. Het niet-uniform toegediende beregeningswater blijft op het gewasperceel. Een deel van het naar beneden de wortelzone gepercoleerde water kan via capillaire opstijging alsnog weer in de wortelzone terecht komen. En vanuit het regionaal watersysteem beschouwd zijn percolatieverliezen so wie so geen verliezen.

In bijlage 7.1 zijn samenvattingen van aanvullende recente literatuur bij elkaar gezet.

2.3 Conclusies uit het literatuuronderzoek

De belangrijkste conclusies uit het literatuuronderzoek zijn:

1. Bij beregening midden overdag zijn de verdampingsverliezen bij het gebruik van een spuithaspel 3 à 6% van de beregeningsgift.
2. Driftverliezen nemen meer dan lineair toe met de windsnelheid en kunnen aanzienlijk zijn, tot meer dan 10% bij windsnelheden boven 3 m/s (matige wind).
3. Interceptieverdampingsverliezen zijn maximaal 10%, maar deze zijn voor de gewassen niet te beschouwen als verliezen en beïnvloeden daarom beregeningsefficiëntie niet.
4. De verdeling van de beregening over het beregende perceel bij het gebruik van een spuithaspel is gevoelig voor wind. Daardoor kunnen de percolatieverliezen bij windsnelheden van 3 m/s (matige wind) toenemen naar 12%, maar dit verdient nadere experimentele onderbouwing.
5. Het niet beregenen bij windsnelheden >3 m/s beperkt de drift- en percolatieverliezen en dit beperkt het aantal plekken binnen het beregende perceel waar te weinig wordt beregend.

In de volgende sectie zal deze schatting nader worden onderbouwd. Uitgangspunt van de analyse met uurgegevens van metingen op automatische weerstations (AWS) van het KNMI is dat de relatieve verschillen tussen overdag en 's nachts beregenen, die zijn afgeleid van meteorologische variabelen bij veelal buitenlandse experimenten, ook van toepassing zijn op de Nederlandse beregeningspraktijk. We geven daarbij een analyse van verdampings- en driftverliezen, omdat met name windsnelheid een belangrijke factor blijkt. Percolatieverliezen hebben we niet expliciet beschouwd, met name vanwege het korte bestek waarin deze studie is uitgevoerd. Er zijn duidelijke parallellen met driftverliezen vanwege de factor windsnelheid en verschillen hierin tussen dag en nacht.

3 Expertkennis en kennis uit literatuur toegepast op Nederlandse beregeningspraktijk

3.1. Formules uit de literatuur

Formules uit de literatuur Veel literatuur en methodieken om beregeningsverliezen te berekenen stammen uit het buitenland. Er zijn daartoe buitenlandse proeven, data en informatie gebruikt van het weer (klimaat) om formules te maken, ijken en toe te passen. Of ze voor Nederlandse condities gelden, is de vraag. We nemen echter aan dat het principe en de vorm van de functies ook voor Nederland en de condities in Nederland geldt. We moeten dan nog wel Nederlandse meteorologische gegevens invoeren in de berekeningen.

We hebben de volgende formules uit de literatuur van **Yazar** (1984) toegepast:

1 $$E = 1.68e^{0.29\,u}$$

2 $$E = 1.60e^{0.07\,(e_s - e_0)}$$

3 $$E = 0.978e^{(0.18\,u)}(e_s - e_0)T_a^{-0.37}$$

4 $$E = 0.389e^{(0.18\,u)}(e_s - e_0)^{0.70}$$

5 $$D_{21m} = 0.27u^{2.15}$$

6 $$D_{26m} = 0.10u^{2.39}$$

De formules 1 t/m 4 geven het verdampingsverlies (E) op basis van windsnelheid op 2 m en/of luchtvochtigheid in mbar. In vergelijking 3 is ook de luchttemperatuur meegenomen. Vergelijking 5 en 6 geven waarden voor de driftverliezen (D) via gemeten drift op 21 m en 26 m. De straal van de cirkel van de betreffende beregeningsinstallatie is 18 m, dus de waarden geven de verliezen op 3 m en 8 m buiten de beregeningscirkel.

Sadeghi et al. (2017) geven een relatie voor de Sprinkler Discharge Efficiency (SDE) in vergelijking 7:

7 $$SDE_{hr} = 0.90855 + (1.5923 * 10^{-4}) * RH - (1.22 * 10^{-3}) * T - (-4.89 * 10^{-3}) * WS$$

Deze formule geeft een combinatie weer van het verdampingsverlies (E) en driftverlies (D).

3.2. Gebruikte meteodata

Om meteorologische variatie binnen Nederland enigszins te ondervangen in combinatie met gebieden waar beregend wordt, hebben we drie KNMI-stations gekozen (AWS) waarvoor we op uurbasis hebben gerekend met de genoemde zeven formules: Schiphol, Twente en Volkel. Als variabelen nemen we mee de luchttemperatuur op 1,5 m hoogte, de windsnelheid op 10 m hoogte en de relatieve luchtvochtigheid op 1,5 m hoogte. We hebben gerekend voor de zomerperiode 1 april t/m 30 september voor het droge jaar 2018 en voor de gewassen gras, snijmais en aardappel. Onze zomertijd verschilt twee uur met UTC. In UTC hebben voor de 'dag' gerekend met de uren 10-16 u (duur van de 'dag' is dus 6 uur), voor de 'nacht' van 16-10 u (duur van de 'nacht' is dus 18 u).

In bijlage 7.2 staat het geheel aan data, formules en resultaten weergegeven.

3.3. Resultaten

De verdampingsverliezen voor gras zijn het hoogst (3 à 5%) en nemen iets af naarmate het gewas hoger is. Voor aardappel en snijmais komen deze verliezen uit op <3 à 4%.

De ruimtelijke verschillen in verdampings- en driftverliezen laten zien dat de invloed van de windsnelheid ertoe leidt dat te AWS Schiphol de verliezen 1 à 2% groter zijn dan te AWS Twente en Volkel. AWS Twente en Volkel ontlopen elkaar onderling niet veel.

De ruimtelijke verschillen in verdampings- en driftverliezen op basis van luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid ontlopen elkaar niet veel voor alle AWS in West-, Oost- en Zuid-Nederland.

Omdat grofweg voor alle AWS en alle gewassen de berekende verliezen elkaar niet veel ontlopen, hebben we ervoor gekozen alleen gras verder door te rekenen voor alle zeven genoemde formules.

Onze analyses voor gras leiden tot het volgende resultaat:

- Voor het zomerseizoen als geheel zijn de berekende verdampingsverliezen over de gehele dag genomen gemiddeld 2,5 à 3%;
- Voor het zomerseizoen als geheel zijn de berekende driftverliezen over de gehele dag genomen gemiddeld ongeveer 9%;
- Ten aanzien van de verschillen tussen 'dag' en 'nacht' tonen de berekeningen dat de verdampings- en driftverliezen tijdens de 'dag' groter zijn dan in de 'nacht'. Dit verschil is zowel voor verdampings- en driftverliezen beperkt tot <1 à 3%.

De driftverliezen blijken absoluut gezien groter en daarmee belangrijker te zijn dan verdampingsverliezen en is er weinig verschil tussen de verliezen 'dag' en 'nacht' voor beide typen verliezen.

4 Interpretatie rekenresultaten en discussie

Toepassing van buitenlandse formules onder de Nederlandse meteorologische omstandigheden laat zien dat er verschillen zijn tussen verliezen bij beregening overdag en 's nachts. Grofweg beschouwd zijn de verdampingsverliezen overdag 1 à 3% groter dan 's nachts. De driftverliezen overdag zijn 1 à 3% groter dan 's nachts in West-Nederland; in het zuiden en oosten zijn de verschillen tussen overdag en 's nachts kleiner. De formules zijn veelal gebaseerd op het gebruik van andere beregeningstechnieken dan de spuithaspel. Toepassing van deze formules op de Nederlandse meteorologische omstandigheden geeft daarom een enigszins vertekend beeld van de effecten van overdag of 's nacht beregenen. Een spuithaspel zal andere karakteristieken hebben wat betreft verdampingsverliezen en windgevoeligheid. Die zijn aanmerkelijk lager resp. aanmerkelijk hoger dan van de irrigatiesystemen waarop de formules uit literatuur zijn gebaseerd. Dus het verschil in verdampingsverliezen tussen beregenen overdag en 's nachts is voor een spuithaspel <1%; voor driftverliezen ongeveer 5%.

De percolatieverliezen zijn in de analyse in hoofdstuk 3 niet meegenomen. Op basis van een *'educated guess'* nemen deze toe van 5% bij windstille omstandigheden tot >10% bij een windsnelheid van 3 m/s. Omdat het overdag gemiddeld genomen harder waait, zijn de percolatieverliezen bij beregenen overdag dus groter dan 's nachts.

We constateren een aantal punten ter discussie:

- Eenmaal verdampt water op regionale schaal hoeft niet als geheel verloren te beschouwen, want benedenwinds kan dit leiden tot een hogere luchtvochtigheid en een lagere luchttemperatuur.
- Zijn (literatuur-) data bij buitenlands (ander) klimaat wel/niet overdraagbaar naar Nederland?
- Hoe veranderen de gebruikte formules en bijbehorende parameters bij gebruik van een spuithaspel?
- Beregening is ook om hittestress te voorkomen. Die reden om te beregenen kan haaks staan op een beregeningsverbod overdag.
- Hoe zit het met waterverliezen tijdens beregening van andere gewassen dan in deze deskstudy beschouwd?
- Soms wordt bladverbranding genoemd als reden om niet in de volle zon te gaan beregenen. Is dat waar of is dat een mythe?
- We hebben in Nederland onvoldoende *up to date* kwantitatieve praktijkkennis en metingen ten aanzien van beregening en waterverliezen.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1. Wat weten we

We komen op basis van onze werkzaamheden tot de volgende conclusies:

- een verbod op beregening overdag is weinig effectief om de verdampingsverliezen significant terug te brengen. Beregening overdag levert weliswaar grotere verdampingsverliezen (3 à 6% van de beregeningsgift op dagbasis) op in vergelijking met beregening 's nachts (2 à 3% van de beregeningsgift op dagbasis), maar dit is een zeer gering verschil;
- drift door wind tijdens beregening heeft een groter effect op de beregeningsverliezen dan verdamping tijdens beregening. Omdat het overdag gemiddeld harder waait zijn de driftverliezen bij beregenen overdag 1 à 3% groter ten opzichte van beregenen 's nachts in West-Nederland; deze %-verschillen zijn kleiner in Oost- en Zuid-Nederland;
- percolatieverliezen worden groter naarmate het harder waait (geen schattingen/cijfers bekend of bepaald); deze verliezen zijn overdag groter dan 's nachts;
- niet beregenen bij windsnelheden boven 3 m/s (matige wind) is daarmee effectief om verliezen te beperken, omdat daarmee zowel de driftverliezen als de percolatieverliezen worden gereduceerd. In de praktijk wordt bij voorkeur niet beregend als het 'hard' waait.

Nadere onderbouwing van deze bevindingen door middel van (veld)metingen aan verliezen bij gebruik van een spuithaspel is gewenst. Zo krijgen we een beter en meer binnen het Nederlandse klimaat geldende onderbouwing, want beregenen met de spuithaspel is windgevoelig.

5.2. Nader onderzoek

Tijdens en sinds de afgelopen droge jaren 2018 en 2019 is in de praktijk een toegenomen beregening waargenomen. Installaties zijn aangeschaft en nieuwe waterputten zijn geslagen. De druk op het watersysteem is toegenomen door een groter watergebruik door de landbouw. Het onderwerp zoetwatervoorziening van de landbouw staat meer in de belangstelling, zeker wanneer we klimaatveranderingen in ogenschouw nemen. Daarom is het gewenst discussies omtrent efficiënt watergebruik gegeven een bepaalde waterbeschikbaarheid zoveel mogelijk te voeren op basis van gedegen feiten, metingen en kennis.

We hebben voor deze rapportage een beperkte inzet gepleegd. Een meer gedegen analyse, meer toegesneden op Nederland qua weer en op de praktijk van irrigatie kan de komende tijd nuttig zijn voor beleid en beheer. Een aantal discussiepunten is reeds benoemd. Alvorens deze samen met andere vragen te kunnen omzetten tot nader onderzoek, stellen we voor in de breedte een overzicht op te gaan stellen ten aanzien van de duurzame zoetwatervoorziening van de landbouw, rekening houdend met waterbehoefte van andere gebruikers en gebruiksfuncties tijdens droog weer. Daarnaast is praktijkonderzoek in Nederland naar de verliezen bij beregening en diverse andere vormen van irrigatie van toegevoegde waarde. We bevelen aan onze bevindingen mee te nemen bij relevante fact-sheets en Deltafacts.

6 Referenties

Abo-Ghobar, H.M. (1992). Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation system under hot and dry conditions. *Agricultural Water Science*, 21 (2), 23-32.

Baars, C. (1971). *Ontwerpen van Regeninstallaties*. Weg- en Waterbouwkunde en Irrigatie, Landbouwhogeschool.

Bastiaanssen, W.G.M., M.J.M. Cheema, W.W. Immerzeel, I.J. Miltenburg, and H. Pelgrum, 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Res. Res., 48,* W11512, doi: 10.1029/2011WR010482. https://doi.org/10.1029/2011wr010482.

Bavi, A., Kashkuli, H.A., Boromand, S., Naseri, A. and Albaji, M. (2009). Evaporation losses from sprinkler irrigation system under various operating conditions. *Journal of Applied Sciences*, 9(3), 97-600.

Bruse, M. (2017). Modeling blue infrastructure: Technical description of water related elements and tools in ENVI-nmet V4.

Cavero, J., Medina, E.T., Puig, M., Martinez-Cob, A. (2009). Sprinkler irrigation changes maize canopy microclimate and crop water status, transpiration, and temperature. *Agronomical Journal,* 101, 854–864.

Christiansen, J.E.(1942). *Irrigation by Sprinkling*. California Agricultural Experiment Station Bulletin, 670. University of California.

Clark, R.N., Finley, W. W. (1975). *Sprinkler evaporation losses in the southern plains*. Transactions by the ASAE. Paper No. 75-2573.

Frost, K.R., Schwalen, H.C. (1955). Sprinkler evaporation losses. *Agricultural Engineering*, 36(8), 526-528.

George, T.J. (1957). *Evaporation from irrigation sprinkler sprays as determined by electrical conductivity method.* Unpublished M.S. thesis, University of California, Berkley

Hancock, H.H., Uddin J.M., Smith R.J., Foley, J.P (2014) Micrometeorology of sprinkler irrigation. In*: Agricultural and Forst Meteorology 200 (2015): 293-301.*

Innoue, H. (1963*). Experimental studies on losses due to wind drift in sprinkler irrigation.* Tech. Bull. Kagawa University, 15 (1), p. 50-57.

Kincaid, D.C., Nabil, M., Busch, J.R. (1986). *Spray losses and uniformity with low pressure center pivot.* American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Paper no. 86-2091.

Kohl K.D., Kohl, R.A, DeBoer, D.W. (1987). *Measurement of low flow pressure sprinkler evaporation loss*. Transaction of the ASAE. Paper no. 30, p. 1071-1074.

Kolhoff, M. (2020). Efficiënter omgaan met water en nutriënten voor duurzame klimaatbestendige landbouw in Zeeuws-Vlaanderen. Acacia Water.

Kraus, J.H. (1966). *Application efficiency of sprinkler irrigation and its effects on microclimate.* Transactions of the ASAE. Paper no. 9(5), p.642-645.

Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, P.E.V. van Walsum, 2017. SWAP version 4; Theory description and user manual. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. Available at: http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/416321.

Lamm, F.R., Manges, H.L. (2000). *Partitioning of sprinkler irrigation water by a corn canopy*.

Lorenzini, G. (2002). Air temperature effect on spray evaporation in sprinkler irrigation. *Irrigation and Drainage*, 51(4), p. 301-309.

McLean, R.J. Sri Ranjan, R., Klassen, G. (2000). Spray evaporation losses from sprinkle irrigation systems. *Canadian Agricultural Engineering 41(1): 15.*

Meer, R.W. van der (2020). Watergebruik in de land- en tuinbouw 2017 en 2018. WEcR Nota 2020-030.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the Environment. In 'The state and movement of water in living organisms', G.E. Fogg (Ed.), Cambridge University Press: 205-234.

Playan, E., Zapata, N., Faci, J.M., Tolosa, D., Lacueva, J.L., Pelegrin, J., Salvador, R., Sanchez, I., Lafita, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management,* 84(1-2), p. 89-100.

Playan, E., Salvador, R., Faci, J.M., Zapata, N., Martinez-Cob, A., Sanchez, I. (2005). Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Managemen*t, 76, p.139-159.

Rijtema, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. *Agric. Res. Rep. 659.* Pudoc, Wageningen.

Sadeghi, S.-H., T. Peters, Shafi, B., Amini, M.Z., Stöckle, C. (2017) Continuous variation of wind drift and evaporation losses under a linear moving irrigation system. In: Agricultural water Management 182 (2017): 39-54.

Steiner, J.L., Kanemasu, E.T. and Clark, R.N. (1983). *Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system*. Transcription of ASAE, 26, p. 1128-1134.

Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F., Montero, J. and De Juan, J.A. (2000). Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 43(3), 263-284.

Tarjuelo, J.M., Montero, J., Honrubia, F.T., Ortiz, J.J., Ortega, J. F. (1999). Analysis of uniformity of sprinkler irrigation in a semi-arid area. Agriculture Water Management, 40, p. 315-331.

Thompson, A.L., Gilley, J.R., Norman, J.M. (1993). A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: I. Model development. Transactions of the ASAE, 36(3), 735-741.

Wang, Q., Kang, Y., Liu, H., Liu, S. (2006). Method for measurement of canopy interception under sprinkler irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, 132(2), 185-187.

Wiersma, J.L. (1955). Effect of wind variations om water distribution from rotating sprinklers, Techn. Bull. No. 16 of the Agr. Sta. of South Dakota.

Yazar, A. (1984). Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. Agricultural Water Management, 8, 439-449.

Zazueta, F.S. (2018). Evaporation loss during sprinkler irrigation. BUL290, UF/IFAS Extension, USA.

Fact-sheets:

- Beregening uit grondwater (Deltares/RIVM, 2014)
- Bodemvocht gestuurd beregenen (STOWA-Deltafact, 2017)
- Beregening (STOWA-Deltafact) – in bewerking

Presentaties:

- Vaerten, J., Tavemier, G., Janssens, P., Elsen, F., Reynart, S. (2019). Efficiëntie en uniformiteit van beregening in akkerbouwmatige teelten.
- Vaerten, J. (2019). Efficiëntie van haspelberegening, verschil beregenen dag/nacht. Bodemkundige Dienst België.

7 Bijlagen

7.1. Samenvatting van recente aanvullende internationale literatuur

Kolhoff - Efficiëntie beregening spuithaspel – Stageverslag (2020)

Literatuuroverzicht van beregeningsverliezen met de spuithaspel (zie tabellen 1 en 2), onderscheiden in verdamping, verwaaiing en interceptie

Veldexperiment (aardappelen) uitgevoerd door Acacia Water in 2018 in Zeeuws Vlaanderen met spuithaspel. Verschil watergift – doorval gemeten. Sterk afhankelijk van weercondities en LAI. Zie tabel 4.

Araujo et al. Predictive models of water application and distribution efficiency in conventional sprinkling (2020)

Correct determinations of distribution (Ed) and application (EA) efficiencies allow adequate estimations of the gross irrigation depth. This study aimed: i) to determine the distribution efficiency using the Christiansen uniformity coefficient (CUC) in a sprinkler irrigation system under different weather conditions and working pressures; ii) to compare the mean, median, and cumulative CUC values; and iii) to evaluate the predictive capacity of four EA estimation models. CUC values were determined from 80 assessments, as well as the mean, median, and cumulative. The precipitated water depth accumulated in each collector was considered for the accumulated CUC. More uniform evaluations were used for EA (working pressure of 196 kPa), resulting in 20 samples. Besides being measured, EA was estimated by Keller & Bliesner, Playan, Tarjuelo, and Beskow methods. Statistical indicators were the root mean square error, mean bias error, Willmott agreement index, mean absolute error, and Pearson correlation coefficient. CUC values ranged from 66.51 to 92.04%, and the accumulated CUC provided an improvement over the isolated evaluations. The Beskow model had the best EA estimations in conventional spraying.

Lamm et al. A review of in-canopy and near-canopy sprinkler irrigation concepts (2019)

The use of in-canopy and near-canopy sprinkler application with mechanical-move systems is prevalent in the U.S. Great Plains. These systems can reduce evaporative losses by nearly 15%, but they introduce a much greater potential for irrigation non-uniformity and other water losses. This article is a review of these application technologies for mechanical-move sprinkler irrigation systems that have been widely adopted in the region, where irrigation capacities are typically less than those required to meet "fully irrigated" crop water demand and there is limited seasonal precipitation. Close attention to the design, installation, management, and operating guidelines for these systems can prevent many of the nonuniformity and water loss issues that reduce system performance and crop water productivity.

Neupane et al. Agronomic basis and strategies for precision water management: A review (2019)

Agriculture faces the challenge of feeding a growing population with limited or depleting fresh water resources. Advances in irrigation systems and technologies allow site-specific application of irrigation water within the field to improve water use efficiency or reduce water usage for sustainable crop production, especially in arid and semi-arid regions. This paper discusses recent

development of variable-rate irrigation (VRI) technologies, data and information for VRI application, and impacts of VRI, including profitability using this technology, with a focus on agronomic factors in precision water management. The development in sprinkler systems enabled irrigation application with greater precision at the scale of individual nozzle control. Further research is required to evaluate VRI prescription maps integrating different soil and crop characteristics in different environments. On-farm trials and whole-field studies are needed to provide support information for practical VRI applications. Future research also needs to address the adjustment of the spatial distribution of prescription zones in response to temporal variability in soil water status and crop growing conditions, which can be evaluated by incorporating remote and proximal sensing data. Comprehensive decision support tools are required to help the user decide where to apply how much irrigation water at different crop growth stages to optimize water use and crop production based on the regional climate conditions and cropping systems.

O'Shaughnessy et al. advantages and disadvantages of variable rate irrigation: An updated review (2019)

Variable rate irrigation (VRI) sprinklers on mechanical move irrigation systems (center pivot or lateral move) have been commercially available since 2004. Although the number of VRI, zone or individual sprinkler, systems adopted to date is lower than expected there is a continued interest to harness this technology, especially when climate variability, regulatory nutrient management, water conservation policies, and declining water for agriculture compound the challenges involved for irrigated crop production. This article reviews the potential advantages and potential disadvantages of VRI technology for moving sprinklers, provides updated examples on such aspects, suggests a protocol for designing and implementing VRI technology and reports on the recent advancements. The advantages of VRI technology are demonstrated in the areas of agronomic improvement, greater economic returns, environmental protection and risk management, while the main drawbacks to VRI technology include the complexity to successfully implement the technology and the lack of evidence that it assures better performance in net profit or water savings. Although advances have been made in VRI technologies, its penetration into the market will continue to depend on tangible and perceived benefits by producers.

Naderianfar et al. Estimation of wind drift and evaporation losses in sprinkler irrigation of urban green spaces (2018)

The wind drift and evaporation losses (WDEL) are high in arid, semi-arid and windward areas, and reduce the efficiency of the sprinkler irrigation system; therefore, this study was carried out in order to achieve a practical criterion and provide a relationship for accurate estimation of the wind drift and evaporation losses in different atmospheric conditions. The experiments were done at the Meteorological Station of the Faculty of Agriculture of Ferdowsi University of Mashhad using a line-source sprinkler irrigation system based on the single sprinkler installation method. To achieve the objectives of this plan, factorial experiment was performed on PGP sprinkler with regard to the two factors, the pressure of the sprinkler function (with three levels 1.6, 2.5 and 3.4 bar) and the diameter of the nozzle (with three levels of 4, 5 and 6 mm) with three replications (morning, noon and night). Assessing the result of the data variance analysis showed that the effects of pressure, aperture diameter, and time on the wind drift and evaporation losses are not significant. Investigating the main effects of these factors showed that the effect of aperture diameter on irrigation losses is significant at the level of the 1%. In order to further investigate, the comparison of mean losses data in three aperture diameter was done using Duncan's test. The results indicated that aperture 4 with the losses of 44% had a significant difference with other diameters. This result suggests an increase in losses for smaller diameters due to the small droplets and the increase in wind drift. Also, the comparison of the mean losses data in three times showed that irrigation at

noon with the losses of 44% had a significant difference compared to other times due to a significant increase in temperature and radiation of the sun and saturation vapor pressure deficit, and there is no significant difference between morning and evening irrigation. Also, analysis of variance showed that the effect of water pressure change between 1.6 and 4.3 bar does not have a significant effect on the WDEL in this sprinkler. In general, the results showed that increasing wind speed increases the losses of evaporation and wind. Also, this study suggested that changing the irrigation time in areas with hot and dry days, from day to night in summer, leads to a significant reduction of the wind drift and evaporation losses.

Sadeghi et al. Continuous variation of wind drift and evaporation losses under a linear move irrigation system (2017)

The traditional catch-can technique for measuring water depth application under sprinkler irrigation systems has the limitation of being unable to monitor the continuous variation of wind drift and evaporation losses (WDEL) under changing weather conditions. Such information is essential to better manage the agricultural water by improving the global water application uniformity under moving irrigation machines. Three parallel, long, impermeable water collection strips were constructed underneath a stationary linear move irrigation system to address this issue. The sprinkler discharge efficiency (SDE ≈ 1- WDEL) was monitored over 5-min intervals (SDE_{5min}) during Apr-Aug of 2014-on a bare experimental plot. Experiments were conducted on a discrete basis for about 1040 h total in order to collect more than 11,600 SDE_{5min} data points. It was found that the SDE_{5min} is very dynamic and can experience abrupt changes up to 16.5% as a result of sudden changes in wind speed and direction. The maximum and minimum observed SDE_{5min} during the study period were 97.5 and 73.6%, respectively. The difference between maximum and minimum SDE_{5min} during a day/night cycle was controlled by solar radiation and maximum wind speed. The average hourly SDE (SDE_{hr}) for data collected at predawn, morning, afternoon, and evening were 89.5, 87.7, 86.9 and 88.8%, respectively. Overall, the daily SDE was mainly controlled by air temperature and varied between 81.8 and 91.8%, indicating that ~8–18% of the daily applied water was lost on average. A multiple linear regression model was developed to help predict the SDE_{hr} as a function of weather parameters. The model indicated wind speed, temperature and relative humidity as the best explanatory variables and predicted the SDE_{hr} with an absolute error just over 4%. Because the difference between maximum and minimum SDE_{hr} over a full experimental day could be as high as 22%, this magnitude of error was considered to be acceptable for wind drift and evaporation loss estimation.

Urrego-Pereira - Sprinkler Irrigation Time and Water (2013)

Daytime sprinkler irrigation with a solid-set system can result in higher water losses, lower uniformity, and lower maize (*Zea mays* L.) yield compared with nighttime irrigation. We studied the relevance of irrigation time (daytime or nighttime) and water losses (compensating them or not in the irrigation applied) for the growth and yield of maize during 2 yr. The seasonal average sprinkler water losses compensated ranged from 14 to 19% for daytime irrigation and from 5 to 11% for nighttime irrigation. The average Christiansen coefficient of uniformity (CU) was similar for daytime and nighttime irrigation in 2009 (84%) but lower for daytime irrigation (78%) than nighttime irrigation (84%) in 2010. Daytime irrigation decreased the maize grain yield by 9% in the year that the CU was reduced. Increasing the water applied to compensate the water losses increased the soil matric potential but did not increase maize yield. The lower irrigation uniformity for daytime sprinkler irrigation compared with nighttime sprinkler irrigation seems to be a relevant reason for the yield reduction. Solid-set sprinkler irrigation systems for maize should be designed to minimize daytime irrigation or to allow a high daytime irrigation uniformity (>84%).

Latif et al. Operational analysis of water application of a sprinkler irrigation system installed in a golf course: Case study (2008)

Popup sprinkler irrigation systems are usually installed in golf courses, orchards, and lawns. Evaluation of these systems is considered essential to identifying any necessary improvements. To this end some performance indicators have evolved for comparison of the existing performance with established design criteria of the system. The irrigation uniformity and application efficiency of any irrigation system are important factors which are strongly affected by pressure and wind speed. In this study, the water application uniformity, system efficiency, water application rates, jet losses, and soil infiltration characteristics were considered as the basic performance indicators. The low quarter distribution uniformity of the system varied from 43 to 57% and the application efficiency was found to be only 34-47%. The Christiansen uniformity coefficient varied from 61.7 to 68.9% for different operating pressures. More losses were found for day time irrigation than for night time irrigation. Surface runoff was observed at the bottom of the mounds due to high infiltration at their tops. Overall performance of the system was found unsatisfactory and some changes are suggested for its improvement.

Schneider - Efficiency and uniformity of the LEPA and spray sprinkler methods: A review (2000)

Application efficiencies and uniformity coefficients reported for the low energy precision application (LEPA) and spray sprinkler irrigation methods are reviewed and summarized. The relative sizes of the water loss pathways for the two sprinkler methods are also summarized. With negligible runoff and deep percolation, reported application efficiencies for LEPA are typically in the 95 to 98% range. Measurements such as chemical tracers, weighing lysimeter catches, and energy balance modeling are believed to be more accurate than small collector measurements for estimating spray application efficiency. Spray application efficiencies based on these other measurements exceed 90% when runoff and deep percolation are negligible. Because of the start and stop nature of mechanical move irrigation systems, uniformity coefficients for LEPA and spray are measured both along the irrigation system mainline and in the direction of travel. Along the mainline, reported uniformity coefficients are generally in the 0.94 to 0.97 range for LEPA and in the 0.75 to 0.85 range for spray. In the direction of travel, the uniformity coefficients are generally in the 0.75 to 0.85 range for LEPA with furrow diking and in the 0.75 to 0.90 range for spray. On start and stop sprinkler systems, basin tillage on a 2 to 4 m spacing is critical for uniform LEPA irrigation because the basins prevent runoff and average the applications during several unequal start and stop times. Runoff is the largest potential water loss pathway for both LEPA and spray irrigation. For the spray method, runoff can exceed either droplet evaporation and drift or non-beneficial canopy evaporation.

McNaughton - Net interception losses sprinkler irrigation (1981)

Micrometeorological theory of advection is used to model interception losses contingent

on sprinkler irrigation. Using power-law descriptions of the wind speed and effective

diffusivities appropriate for neutral conditions, equations are developed to calculate the

evaporation enhancement from the area wetted by the spray droplets, and also to calculate the evaporation depression in the area downwind of the sprinkler setting. Within the accuracy of the calculations, the fraction of applied water lost by net interception processes from the whole field can be expressed by N = (52 -- T) x 10-s *rcu,Ei/A* where E I is the upwind evaporation rate, A is the water application rate, r c is the crop canopy resistance, u, is the friction velocity, and T is surface temperature in degrees Celsius. Substitution of reasonable values into this equation shows that net interception losses comprise a small fraction of applied water, usually much less than 10%.

7.2. Verdampings- en driftverliezen bij beregening

In deze bijlage staan de formules en resultaten van berekeningen vermeld. Er staan korte beschrijvende (ruwe) teksten bij, deze zijn nader geformuleerd en geduid in de hoofdtekst van dit rapport. Een belangrijk aspect hierbij is dat de gebruikte formules niet uitgaan van het gebruik van een spuithaspel.

Het gebruikte decimaalteken is veelal een punt (.) .

De verdampings- en driftverliezen zijn onderzocht voor drie locaties die een beeld moeten geven van de verschillen binnen Nederland. Deze drie locaties zijn de vliegbases Schiphol, Twente en Volkel (alle stations zijn AWS van het KNMI).

Voor de analyse is uitgegaan van het droge jaar 2018. Voor de drie locaties zijn door het KNMI-uurdata beschikbaar gesteld voor verschillende meteorologische parameters.

T	lucht temperatuur op 1,5 m (°C)
U	relatieve vochtigheid op 1,5 m (%)
TD	dauwpuntstemperatuur (°C)
TW	nattebol temperatuur (°C)
DD	windrichting op 10 m (graden)
FH	windsnelheid op 10 m (m/s)
RH	neerslag (mm/uur)
Q	inkomende zonnestraling (J/cm2/uur)

Het tijdstip in de datafile is het uurvak in de dag, dus 1 is van 00:00-01:00 Universal Time en dat is dus van 02:00-03:00 Nederlandse zomertijd.

Het doel is om te onderzoeken of de verdampingsverliezen en/of driftverliezen overdag aanmerkelijk groter zijn dan 's nachts. Om dit te onderzoeken is de dag opgedeeld in twee delen, de gemeten waarden op uur 11 t/m uur 16 uur in table_2019.xlsx (7 data) zijn gerekend tot de dag en de overige uren (<11 en >16) als behorend tot de "nacht". De dagperiode komt ongeveer overeen met 10:20-16:20 UTC oftewel 12:20-18:20 Zomertijd. Er is uitgegaan van de periode 1 april t/m 30 september. De analyse is verder uitgevoerd voor 3 gewassen, nl. gras, aardappelen en mais.

Voor de analyse van de verdampingsverliezen (E) en driftverliezen (D) is gebruik gemaakt van relaties uit het artikel van Yazar (1984) die opgesteld zijn voor een vaste beregeningsinstallatie met sproeiers op 1,20 m hoogte. In deze relaties wordt gebruik gemaakt van de windsnelheid op 2 m in m/s, de verzadigde (e_s) en actuele (e_0) dampspanning en de temperatuur in °C. De formules zijn op uurbasis toegepast.

Yazar (1984) geeft de volgende formules:

1 $$E = 1.68e^{0.29\,u}$$

2 $$E = 1.60e^{0.07\,(e_s - e_0)}$$

3 $$E = 0.978e^{(0.18\,u)}(e_s - e_0)T_a^{-0.37}$$

4 $$E = 0.389e^{(0.18\,u)}(e_s - e_0)^{0.70}$$

5 $$D_{21m} = 0.27u^{2.15}$$

6 $$D_{26m} = 0.10u^{2.39}$$

De formules 1 t/m 4 geven het verdampingsverlies (E) op basis van windsnelheid op 2 m en/of luchtvochtigheid in mbar. In vergelijking 3 is ook de temperatuur meegenomen.

Vergelijking 1 en 2 zijn gecontroleerd, door het aflezen van de waarden uit de figuur en vervolgens hierdoor een functie te fitten, de coëfficiënten van de gefitte functie komen goed overeen met de coëfficiënten volgens Yazar.

Vergelijking 5 en 6 geven waarden voor de verliezen via drift op 21 m en 26 m. De straal van de cirkel van de beregeningsinstallatie is 18 m, dus de waarden geven de verliezen op 3 m en 8 m buiten de beregeningscirkel.

Sadeghi et al (2017) geeft een relatie voor de Sprinkler Discharge Efficiency (SDE) in vergelijking 7. De relatie tussen SDE en de Wind Drift and Evaporation Losses (WDEL) is gegeven in vergelijking 8, en kunnen worden vergeleken met de resultaten van Yazar.

7 $$SDE_{hr} = 0.90855 + (1.5923 * 10^{-4}) * RH - (1.22 * 10^{-3}) * T - (-4.89 * 10^{-3}) * WS$$

8 $$SDE \approx 1 - WDEL$$

in de formule van Sadeghi is RH de relatieve luchtvochtigheid in %, T de temperatuur in °C en WS de windsnelheid in m/s.

De windsnelheid wordt in Nederland gemeten op 10 m boven maaiveld. De windsnelheid neemt logaritmisch toe met de hoogte. Om de windsnelheid om te rekenen naar een snelheid op 2 m is onderstaande relatie gebruikt:

9 $$v_h = \frac{v_{10} \times log\frac{h}{z}}{log\frac{10}{z}}$$

v windsnelheid in m/s op 2 resp. 10 m boven maaiveld

h hoogte waarvoor de windsnelheid wordt berekend in dit geval 2 m

z ruwheidshoogte van het landschap in m

De gewassen waarvoor de analyse wordt uitgevoerd verschillen in ruwheidshoogte. In tabel 1 zijn voor enkele gewassen ruwheidshoogten gegeven.

Tabel 1 Ruwheidshoogten voor enkele landschapsvormen.

Terrain Description	Surface Roughness Length, z_o (m)
Very smooth, ice or mud	0.00001
Calm open sea	0.0002
Blown sea	0.0005
Snow surface	0.003
Lawn grass	0.008
Rough pasture	0.01
Fallow field	0.03
Crops	0.05
Few trees	0.1
Many trees, hedges, few buildings	0.25
Forest and woodlands	0.5
Suburbs	1.5
Centers of cities with tall buildings	3.0

Voor de berekening van de windsnelheid op 2 m boven maaiveld zijn de volgende ruwheidshoogten aangehouden:

gras 0.03 m

aardappelen	0,05 m
mais	0.25 m

Als eerste stap zijn met formule 7 windsnelheden per uur voor de drie gewassen berekend. Vervolgens is de verzadigde dampspanning (e_s) berekend met de formule van Magnus (formule 10).

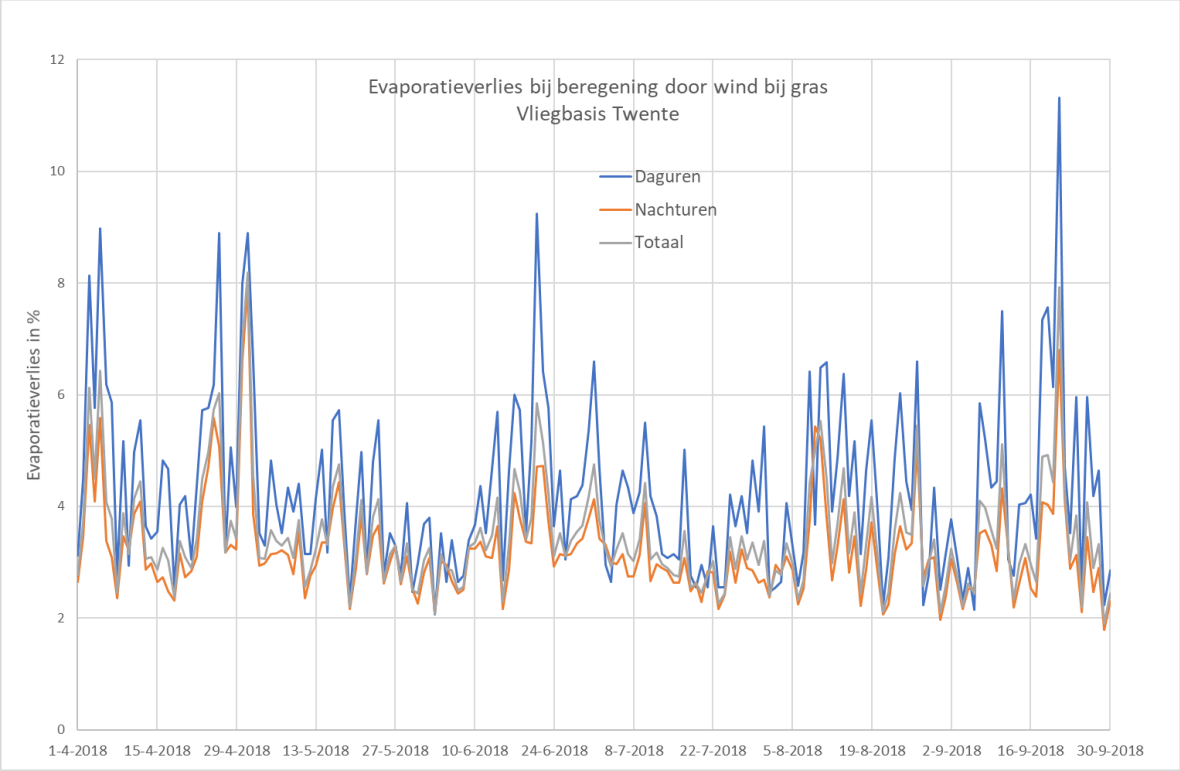
10 $$e_s(T) = 6.1094 \exp(\frac{17.625\,T}{T+243.04})$$

De actuele dampspanning (e_o) is berekend met gebruikmaking van de relatieve vochtigheid (Φ) en verzadigde dampspanning (e_s) (formule 11).

11 $$e_o = \emptyset \times e_s \times 0.01$$

Vervolgens zijn de 7 formules 1 t/m 7 toegepast, op de data van de 3 locaties.

In figuur B.1 is een voorbeeld gegeven van het gemiddelde evaporatieverlies op dagbasis, onderverdeeld in daguren (11-16 uur), "nachturen" (overige uren van de dag) en gemiddelde van alle uren op de dag, voor beregend gras op basis van formule 1.



Figuur B.1 Evaporatieverlies bij beregening van gras door wind in het jaar 2018 voor vliegbasis Twente

Uit figuur B.1 is af te leiden dat de verliezen door wind meestal gering zijn, meestal lager dan 6% op enkele uitschieters na, het verlies is bijna altijd minimaal 3%.

In tabel 2 zijn de gemiddelde verliezen per maand voor de gewassen gras, aardappelen en mais weergegeven voor de drie locaties.

Tabel 2 Formule 1 Gemiddeld evaporatieverlies op basis van windsnelheid en landbouwgewas

	Evaporatieverlies bij gras Schiphol			Evaporatieverlies bij aardappelen Schiphol			Evaporatieverlies bij mais Schiphol		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	6.15	4.80	5.13	5.84	4.59	4.90	4.53	3.71	3.92
mei	4.85	4.15	4.33	4.65	3.99	4.16	3.78	3.31	3.43
juni	5.66	4.50	4.79	5.39	4.33	4.59	4.26	3.56	3.74
juli	5.50	3.74	4.18	5.24	3.62	4.02	4.15	3.09	3.35
augustus	5.83	4.00	4.46	5.55	3.85	4.28	4.35	3.23	3.51
september	6.98	4.34	5.00	6.58	4.16	4.77	4.94	3.42	3.80
Zomer	**5.82**	**4.25**	**4.64**	**5.54**	**4.09**	**4.45**	**4.33**	**3.39**	**3.62**
	Twente			Twenthe			Twenthe		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	4.97	3.61	3.95	4.76	3.50	3.81	3.86	3.01	3.22
mei	4.10	3.27	3.48	3.96	3.18	3.38	3.34	2.79	2.93
juni	4.28	3.24	3.50	4.12	3.15	3.40	3.45	2.78	2.95
juli	3.82	2.91	3.14	3.70	2.85	3.06	3.16	2.56	2.71
augustus	4.15	3.18	3.42	4.01	3.10	3.32	3.36	2.72	2.88
september	4.50	3.10	3.45	4.33	3.02	3.35	3.56	2.67	2.90
Zomer	**4.30**	**3.22**	**3.49**	**4.14**	**3.13**	**3.38**	**3.45**	**2.75**	**2.93**
	Volkel			Volkel			Volkel		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	4.52	3.37	3.66	4.35	3.27	3.54	3.59	2.85	3.03
mei	3.91	3.18	3.37	3.78	3.10	3.27	3.22	2.73	2.85
juni	3.74	2.98	3.17	3.63	2.92	3.09	3.12	2.61	2.74
juli	3.81	2.82	3.07	3.69	2.76	3.00	3.15	2.50	2.66
augustus	4.12	3.18	3.41	3.98	3.09	3.31	3.34	2.72	2.88
september	4.47	3.05	3.41	4.30	2.98	3.31	3.54	2.64	2.86
Zomer	**4.09**	**3.10**	**3.35**	**3.95**	**3.02**	**3.25**	**3.33**	**2.67**	**2.84**

De verliezen zijn het grootst voor gras en nemen af naarmate het een hoger gewas betreft. Dit betekent ook dat in het begin van de zomer de verliezen voor aardappelen en mais groter zijn dan weergegeven in tabel 2 omdat het gewas nog niet is volgroeid. Verder zijn de verschillen tussen Volkel en Twente gering en zijn de verliezen voor Schiphol ca 1-1,5% groter dan voor Twente en Volkel.

De maandelijkse verschillen tussen dag en nacht beregenen variëren voor Twente en Volkel tussen 0,7-1,4% en voor Schiphol tussen 0.7-2,6% voor gras met de hoogste waarden in de maand september.

In tabel 3 zijn de evaporatieverliezen op basis van de luchtvochtigheid weergegeven.

Tabel 3 Formule 2 Evaporatieverlies op basis van luchtvochtigheid

Evaporatieverlies agv luchtvochtigheid			
	Schiphol		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	2.74	2.01	2.19
mei	3.69	2.38	2.71
juni	3.21	2.19	2.45
juli	6.29	3.09	3.89
augustus	4.26	2.40	2.86
september	2.79	2.01	2.20
Zomer	**3.84**	**2.35**	**2.72**
	Twente		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.63	2.19	2.55
mei	4.94	2.63	3.21
juni	3.80	2.31	2.68
juli	9.00	3.56	4.92
augustus	5.94	2.73	3.53
september	3.57	2.10	2.47
Zomer	**5.17**	**2.59**	**3.24**
	Volkel		
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.42	2.12	2.45
mei	4.50	2.53	3.02
juni	4.08	2.33	2.77
juli	9.99	3.75	5.31
augustus	6.48	2.78	3.70
september	3.46	2.08	2.42
Zomer	**5.35**	**2.60**	**3.29**

De verliezen als gevolg van luchtvochtigheid zijn overdag duidelijk groter dan 's nachts, en deze verschillen zijn in het westen (Schiphol) lager, gemiddeld 1,5% dan in Twente en Volkel, gemiddeld resp. 2,6 en 2,75%. In de maand juli was het gemiddelde verschil in Volkel 6,2% en Twente 5,4% tegen 3,2% voor Schiphol.

In tabel 4 zijn de evaporatieverliezen weergegeven op basis van windsnelheid, luchtvochtigheid en temperatuur.

Tabel 4 Formule 3 Evaporatieverlies op basis van windsnelheid grasland, luchtvochtigheid en temperatuur

Windsnelheid gras, luchtvochtigheid en temperatuur			
Schiphol			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.45	1.67	2.11
mei	3.97	2.11	2.58
juni	3.77	1.96	2.41
juli	5.78	2.74	3.50
augustus	4.39	1.88	2.50
september	4.03	1.63	2.23
Zomer	**4.24**	**2.00**	**2.56**
Twente			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.92	1.74	2.30
mei	4.53	2.15	2.75
juni	3.75	1.66	2.18
juli	5.71	2.51	3.31
augustus	4.30	1.87	2.48
september	3.91	1.43	2.05
Zomer	**4.36**	**1.90**	**2.52**
Volkel			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.57	1.51	2.03
mei	4.20	1.99	2.54
juni	3.60	1.59	2.09
juli	5.92	2.70	3.51
augustus	4.45	1.85	2.50
september	3.83	1.36	1.98
Zomer	**4.27**	**1.84**	**2.45**

De verschillen in evaporatieverlies verschillen weinig over het land, blijkbaar komt het grotere verlies door de windsnelheid in het westen overeen met een groter verlies door luchtvochtigheid in het oosten en zuiden van het land. De verschillen tussen dag en nacht zijn gemiddeld 2,2% in het westen en 2,4% in het oosten en zuiden van het land. De hoogste gemiddelde waarden voor de verschillen variëren tussen 3,0% in het westen en 3,2% in het zuiden en oosten in de maand juli.

In tabel 5 is het evaporatieverlies door alleen de windsnelheid en de luchtvochtigheid weergegeven

Tabel 5 Formule 4 Evaporatieverlies op basis van windsnelheid grasland en luchtvochtigheid

Windsnelheid gras en vochtdeficiet			
Schiphol			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.06	1.44	1.85
mei	3.68	1.94	2.38
juni	3.58	1.86	2.29
juli	5.54	2.62	3.35
augustus	4.20	1.83	2.43
september	3.74	1.53	2.08
Zomer	**3.98**	**1.88**	**2.40**
Twente			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.49	1.50	2.00
mei	4.20	1.95	2.52
juni	3.56	1.59	2.08
juli	5.47	2.39	3.16
augustus	4.12	1.81	2.39
september	3.61	1.33	1.90
Zomer	**4.08**	**1.77**	**2.35**
Volkel			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.19	1.31	1.78
mei	3.91	1.82	2.34
juni	3.42	1.53	2.00
juli	5.68	2.57	3.35
augustus	4.25	1.79	2.41
september	3.56	1.27	1.84
Zomer	**4.01**	**1.72**	**2.29**

Voor west Nederland is het verschil tussen dag en nacht gemiddeld, 2,1% en voor oost en zuid Nederland 2,3%.

Als gevolg van wind wordt beregeningswater verplaatst en bereikt de bodem buiten de cirkel waarbinnen beregening zou moeten plaatsvinden, dit heet drift. Hierdoor zal een deel van de te beregenen cirkel minder water ontvangen en kan een deel van het water buiten de te beregenen cirkel of perceel terechtkomen, bijv. op een weg of sloot. Door Yazar is op twee afstanden "benedenstrooms" van de beregeningscirkel gemeten, met de gevonden relaties is het driftverlies op deze afstanden berekend.

Tabel 6 Formule 5 Driftverlies gemeten op 3 m buiten de beregeningscirkel

Driftverlies op 21 m			
Schiphol			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	6.65	4.34	4.92
mei	4.41	3.11	3.43
juni	5.76	3.81	4.30
juli	5.47	2.57	3.30
augustus	6.16	3.05	3.82
september	7.87	3.53	4.61
Zomer	**6.04**	**3.39**	**4.06**
Twente			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	4.64	2.40	2.96
mei	3.13	1.77	2.11
juni	3.44	1.72	2.15
juli	2.62	1.25	1.59
augustus	3.27	1.73	2.12
september	3.87	1.59	2.16
Zomer	**3.49**	**1.74**	**2.18**
Volkel			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.88	2.03	2.49
mei	2.78	1.65	1.93
juni	2.50	1.33	1.62
juli	2.64	1.11	1.49
augustus	3.19	1.70	2.07
september	3.80	1.54	2.11
Zomer	**3.13**	**1.56**	**1.95**

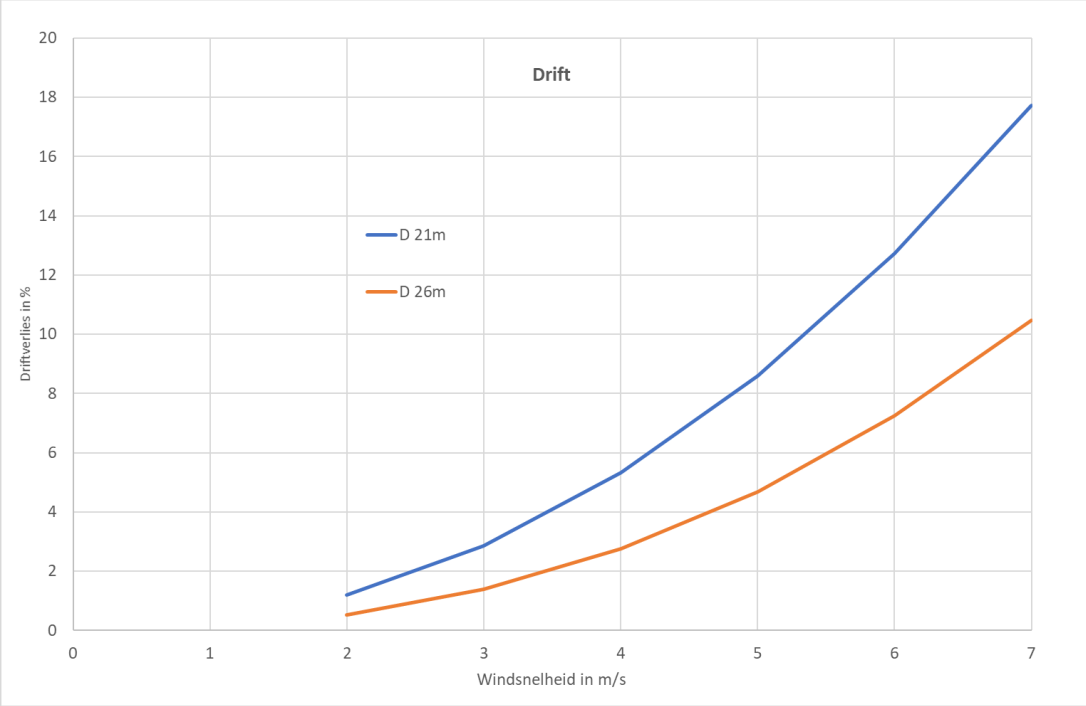
Het driftverlies op 3 m afstand is in west Nederland gemiddeld overdag ca 6.0% en is 's nacht 2,6% lager. In oost en zuid Nederland is het driftverlies lager en zijn de verschillen tussen dan en nacht geringer 1,6-1,7%.

Op groter afstand nemen de driftverliezen uiteraard af.

Tabel 7 Formule 6 Driftverlies gemeten op 8 m buiten de beregeningscirkel

Driftverlies op 26 m			
Schiphol			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	3.65	2.32	2.66
mei	2.32	1.62	1.80
juni	3.10	1.99	2.27
juli	2.96	1.30	1.71
augustus	3.36	1.59	2.03
september	4.45	1.88	2.52
Zomer	**3.30**	**1.78**	**2.16**
Twente			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	2.44	1.21	1.52
mei	1.58	0.87	1.04
juni	1.75	0.82	1.05
juli	1.29	0.58	0.76
augustus	1.67	0.85	1.06
september	2.02	0.77	1.09
Zomer	**1.79**	**0.85**	**1.08**
Volkel			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	2.01	1.02	1.26
mei	1.38	0.80	0.95
juni	1.22	0.62	0.77
juli	1.31	0.52	0.71
augustus	1.62	0.84	1.03
september	1.99	0.76	1.07
Zomer	**1.59**	**0.76**	**0.97**

Het driftverlies op 8 m afstand is in west Nederland gemiddeld overdag 3.3% en is 's nacht 1,5% lager. In oost en zuid Nederland is het driftverlies lager en zijn de verschillen tussen dan en nacht geringer 0,8-0,9%. Voor het beeld van de grootte het driftverlies als functie van de windsnelheid zijn de relaties 5 en 6 uitgezet in figuur 2.



Figuur 2 Driftverlies als functie van de windsnelheid.

Bij hoge windsnelheden kan het verlies door drift aanzienlijk zijn.

In tabel 8 zijn de berekende WDEL waarden met de formule van Sadeghi et al (2017) weergegeven.

Tabel 8 Formule 7 WDEL:Wind Drift and Evaporation Losses

WDEL			
Schiphol			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	11.95	10.73	11.04
mei	12.32	11.14	11.44
juni	12.47	11.36	11.64
juli	13.19	11.60	12.00
augustus	12.77	11.31	11.67
september	12.43	10.92	11.30
Zomer	**12.53**	**11.18**	**11.52**
Twente			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	12.04	10.44	10.84
mei	12.43	10.93	11.30
juni	12.26	10.90	11.24
juli	13.08	11.24	11.70
augustus	12.54	10.98	11.37
september	12.11	10.39	10.82
Zomer	**12.42**	**10.82**	**11.22**
Volkel			
Maanden	Daguren	Nachturen	Dagtotaal
april	11.81	10.30	10.68
mei	12.29	10.81	11.18
juni	12.13	10.81	11.14
juli	13.14	11.34	11.79
augustus	12.59	11.03	11.42
september	12.07	10.38	10.80
Zomer	**12.34**	**10.78**	**11.17**

De gemiddelde maandelijkse verschillen voor WDEL tussen dag en "nacht" zijn gering, voor Schiphol variëren deze tussen 1,1-1,6% en voor Twente en Volkel tussen 1,3-1,8%

In tabel 9 zijn de gemiddelde verschillen per dag als maandgemiddelde samengevat voor de 7 gebruikte formules en het gewas gras.

Tabel 9 Verschil tussen dag en nachturen op basis van 6 formules

Formule	1	2	3	4	5	6	7
Schiphol							
Maanden	Daguren – Nachturen						
april	1.35	0.73	1.78	1.62	2.31	1.33	1.22
mei	0.70	1.31	1.86	1.74	1.30	0.70	1.18
juni	1.16	1.02	1.81	1.72	1.95	1.11	1.11
juli	1.76	3.20	3.04	2.92	2.90	1.66	1.59
augustus	1.83	1.86	2.51	2.37	3.11	1.77	1.46
september	2.64	0.78	2.40	2.21	4.34	2.57	1.51
Zomer	1.57	1.49	2.24	2.10	2.65	1.52	1.35
Twente							
Maanden	Daguren – Nachturen						
april	1.36	1.44	2.18	1.99	2.24	1.23	1.60
mei	0.83	2.31	2.38	2.25	1.36	0.71	1.50
juni	1.04	1.49	2.09	1.97	1.72	0.93	1.36
juli	0.91	5.44	3.20	3.08	1.37	0.71	1.84
augustus	0.97	3.21	2.43	2.31	1.54	0.82	1.56
september	1.40	1.47	2.48	2.28	2.28	1.25	1.72
Zomer	1.08	2.58	2.46	2.31	1.75	0.94	1.60
Volkel							
Maanden	Daguren – Nachturen						
april	1.15	1.30	2.06	1.88	1.85	0.99	1.51
mei	0.73	1.97	2.21	2.09	1.13	0.58	1.48
juni	0.76	1.75	2.01	1.89	1.17	0.60	1.32
juli	0.99	6.24	3.22	3.11	1.53	0.79	1.80
augustus	0.94	3.70	2.60	2.46	1.49	0.78	1.56
september	1.42	1.38	2.47	2.29	2.26	1.23	1.69

De gemiddelde verschillen per maand tussen dag en nacht-beregenen zijn in tabel 8 ingekleurd, waarden lager dan 1% zijn grijs, 2-3% wit, 3-5% geel en >5% zijn oranje ingekleurd.

De verliezen door evaporatie zijn overwegend tussen de 2-3% tussen beregenen overdag en 's nachts. De maand juli geeft hogere verliezen dan 3%, dit komt niet door de wind maar door de luchtvochtigheid. In oost en zuid Nederland geeft ook de maand augustus op basis van formule 2 een verlies van meer dan 3%. Voor drift op 3 m vinden we in de maanden augustus en september voor Schiphol waarden hoger van 3%. Bij drift zien we een duidelijke afname van het drift bij toenemende afstand tot de beregeningscirkel.

De formules van Yazar geven het evaporatieverlies en Sadeghi de winddrift en evaporatieverlies (WDEL). Sadeghi gebruikt voor de berekening van de WDEL, de relatieve luchtvochtigheid, de temperatuur en de windsnelheid. In formule 3 van Yazar worden deze meteorologische parameters eveneens gebruikt. Vergelijking van de resultaten van formule 3 en 7 laat zien dat de evaporatieverliezen volgens Yazar (formule 3) hoger uitvallen dan de WDEL volgens Sadeghi. Landelijk verschillen de gemiddelde maandelijkse evaporatieverliezen volgens Yazar en de WDEL nauwelijks, wel zijn er verschillen tussen de maanden deze variëren tussen 0,55% (april) en 1,45% (juli).

Sadeghi S.H., T. Peters, B. Shafii, M.Z Amini and C. Stockle, 2017. Continuous variation of wind drift and evaporation losses under a linear move irrigation system. Agricultural Water Management 182 (2017) 37-54. Elsevier, Amsterdam.

Yazar A., 1984. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. Agricultural Water Management, 8 (1984) 439-449. Elsevier, Amsterdam.

© KnowH2O – De Bakelse Stroom – WUR WEnR – WUR SLM – KNMI (2020)