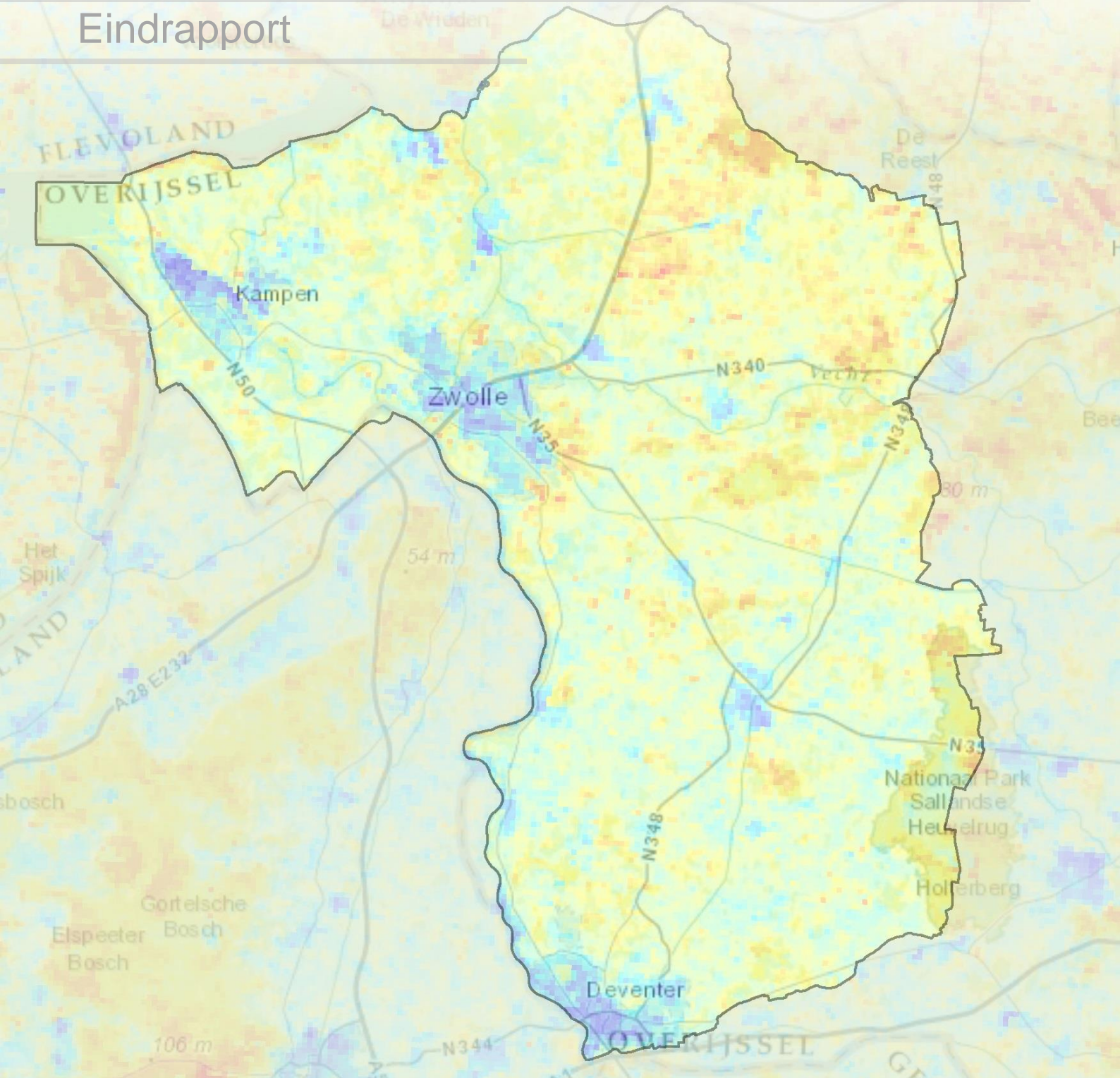


De toegevoegde waarde van Remote Sensing

Eindrapport



De toegevoegde waarde van Remote Sensing voor het bepalen van de verdamping

Auteur: Tom Brouwer
Studentnr.: s1177737
Organisatie: Waterschap Groot Salland
Opdrachtperiode: 21 april 2014 tot en met 27 juni 2014
Bedrijfsbegeleider: M. ter Haar, MSc
Begeleidend docent: Dr. J.J. Warmink

Definitieve versie

Enschede, 11 juli 2014

Samenvatting

Via het 'SAT-WATER' samenwerkingsverband koopt het Waterschap Groot Salland op dagelijkse basis remotely sensed (RS) verdampingsbeelden in over de actuele verdamping en het verdampingstekort. Er is echter nog geen onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van deze verdampingsgegevens. In de huidige situatie wordt de methode Makkink gebruikt om de verdamping te bepalen. Het doel van dit onderzoek is de toegevoegde waarde van de RS verdampingsgegevens ten opzichte van de methode Makkink te bepalen.

Bij verdampingsberekeningen wordt er onderscheid gemaakt tussen potentiële, actuele en referentieverdamping. De potentiële verdamping is de verdamping die van een gewas optreedt bij een optimale waterbeschikbaarheid. De actuele verdamping is de verdamping die werkelijk optreedt en waarbij dus de waterbeschikbaarheid meegenomen wordt. Het verschil tussen de potentiële en de actuele verdamping, het deel dat niet verdampt als gevolg van een lagere waterbeschikbaarheid, wordt ook wel het verdampingstekort genoemd. De referentieverdamping, die bepaald wordt aan de hand van de Makkink en Penman-Monteith methoden, is de verdamping voor gras bij een optimale waterbeschikbaarheid. Deze is dus gelijk aan de potentiële verdamping voor gras. De potentiële verdamping voor andere gewassen wordt vaak berekend door de referentieverdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor.

Om een eerste indicatie van de toegevoegde waarde te krijgen is de kwaliteit van de gegevens beschouwd. Ook is de nauwkeurigheid van de verdampingsgegevens onderzocht, door de RS potentiële verdamping (actuele verdamping + verdampingstekort) te vergelijken met een referentie. Als referentie is de Penman-Monteith methode op basis van meteorologische gegevens, zoals voorgesteld door Allen et al. (1998), toegepast. Daarnaast is de nauwkeurigheid van het RS verdampingstekort bepaald, door deze te vergelijken met het KNMI neerslagtekort. Omdat de actuele verdamping bepaald wordt door het verdampingstekort van de potentiële verdamping af te trekken, geven deze analyses samen een beeld van de nauwkeurigheid van de actuele verdamping. Om een indicatie te krijgen van mogelijke verschillen die optreden bij een overstap naar RS gegevens is er een vergelijking gemaakt tussen de RS actuele verdamping en de referentieverdamping op basis van de methode Makkink. Als laatste is er gekeken naar de mogelijke toepassingen van de RS verdampingsgegevens.

Een eerste beschouwing van de kwaliteit toont aan dat de gegevens waarop de RS verdampingsbeelden gebaseerd zijn, slechts voor een klein deel uit satellietobservaties afkomstig zijn. De invoergegevens bestaan voor een groot deel uit meteorologische puntmetingen. Ook is de resolutie van de gegevens te laag (250m) is om uitspraken te doen over kleine peilgebieden. De toetsing van de nauwkeurigheid toonde aan dat er veel overeenkomsten waren tussen de RS potentiële verdamping en de referentieverdamping op basis van de Penman-Monteith methode. Hoewel voor een koude periode in het voorjaar grote afwijkingen werden waargenomen, bleven deze in de rest van het seizoen beperkt. De cumulatieve afwijking aan het eind van het seizoen was slechts 3mm. Ook bij het beschouwen van grotere gebieden bleven afwijkingen beperkt en waren de RS resultaten naar verwachting. Daarnaast toonde de vergelijking tussen het RS verdampingstekort en KNMI neerslagtekort overeenkomsten. Dit werd verwacht, aangezien de parameter bodemvocht voor de RS gegevens wordt bepaald aan de hand van meteorologische variabelen. Wanneer overgestapt wordt van de methode Makkink naar RS verdampingsgegevens blijven de verschillen voor grasland klein. Hier lag de cumulatieve actuele verdamping (RS) 16mm lager dan de referentieverdamping (Makkink). Voor gebieden met een divers landgebruik ligt de actuele verdamping ongeveer 50mm lager dan de Makkinkverdamping. Voor bosgebieden is de afwijking kleiner (35mm lager dan Makkink) en voor grotendeels bebouwde gebieden groter (88mm lager dan Makkink). Uit een analyse van de mogelijke toepassingen van de verdampingsgegevens is gebleken dat de gegevens alleen toepasbaar zijn wanneer een algemeen beeld van de verdamping nodig is en er uitspraken gedaan moeten worden over grotere gebieden.

Er is geconcludeerd dat de RS gegevens beschouwd kunnen worden als een goed model voor het bepalen van de verdamping. Er moet bij het toepassen van de gegevens echter rekening mee gehouden worden dat de droogte in het gebied afhankelijk is van wateraanvoer en onttrekkingen die niet terug te zien zijn in de RS verdampingsgegevens. Ook kunnen de gegevens alléén voor grotere gebieden toegepast worden. De toegevoegde waarde ligt voornamelijk in het feit dat de RS verdampingsgegevens een accurate weergave geven van de ruimtelijke spreiding van het fenomeen.

Gebruikers van de gegevens moeten rekening houden met het feit dat de gegevens geen inzicht geven in de actuele toestand van het bodemvocht, en daardoor het effect van onttrekkingen en wateraanvoer niet goed weergeven. Bij toekomstige dataleveringen is het nuttig om allereerst een onderzoek uit te voeren naar de herkomst van de gegevens, alvorens de afwijking ten opzichte van andere bepalingsmethoden te bepalen. Momenteel is het niet mogelijk om RS gegevens in te kopen die een accurate weergave van het bodemvocht gebruiken. Hiervoor zijn de resoluties van de huidige generatie satellieten te laag. Er kan wel gezocht worden naar een leverancier die verdampingsgegevens met een hogere resolutie levert. Echter, door de beperkte resolutie van satellietobservaties van het bodemvocht, wordt dit element waarschijnlijk ook in deze gegevens niet tot in detail weergegeven.

Abstract

Through the 'SAT-WATER' partnership, the regional water authority 'Groot Salland' receives remotely sensed (RS) evaporation data, regarding the actual evapotranspiration and the evapotranspiration deficit, on a daily basis. However until now no research has been carried out into the possibilities of these evaporation data. The aim of this investigation is to assess the added value of these remotely sensed data, in comparison to the Makkink method for determining evapotranspiration, which is currently in use.

In evaporation calculations a distinction is made between potential, actual and reference evapotranspiration. The potential evapotranspiration is the evapotranspiration for a well-watered crop. The actual evapotranspiration is the 'real' evapotranspiration which takes into account the water availability. The difference between these two, a measure for the amount of unevaporated water due to water shortage, is called the evapotranspiration deficit. The reference evapotranspiration, calculated among others by the Makkink and Penman-Monteith methods, is the evapotranspiration for well-watered grass. This is equal to the potential evapotranspiration for grass. The potential evapotranspiration for other crops is often calculated using the reference evapotranspiration and multiplying it by a crop factor.

To gain a first insight into this added value, the quality of the data has been examined. Also the accuracy of the evaporation data has been investigated, by comparing the RS potential evapotranspiration (actual evapotranspiration + evapotranspiration deficit) with a reference. As a reference the Penman-Monteith method using meteorological variables, as discussed by Allen et al. (1998), was adopted. Besides this, the accuracy of the RS evapotranspiration deficit was determined by comparing it to the precipitation deficit calculated by the Royal Netherlands Meteorological Institute. Because the actual evapotranspiration is calculated by subtracting the evapotranspiration deficit from the potential evapotranspiration, both analyses together give an insight into the accuracy of the actual evapotranspiration. To get an indication of the possible differences that will arise from a transition to remotely sensed evapotranspiration data, a comparison is made between the RS actual evapotranspiration and the reference evapotranspiration calculated using the Makkink method. Lastly, the possible applications of the RS evaporation data have been investigated.

From the first examination of the quality of the data, it turns out that a relatively small amount of remotely sensed data was used to calculate the evaporation data. The input data consists for the largest part of meteorological spot measurements. Also the resolution of the evaporation images is too low (250m) to draw conclusions about small areas. The investigation into the accuracy showed agreement between the RS potential evapotranspiration and the Penman-Monteith reference evapotranspiration. Although large deviations were observed for a colder period, the deviations remained small for the rest of the season. The cumulative deviation at the end of the season for grassland was only 3mm. For large areas the deviation also remained small, and the results were as expected. The comparison between the RS evapotranspiration deficit and the precipitation deficit showed agreement also. This was to be expected, because the soil moisture data used to derive the evapotranspiration (deficit) was based on meteorological variables. When a transition from the Makkink method to RS evapotranspiration data is made, the differences for grassland will be small. Here the cumulative RS actual evapotranspiration at the end of the season was only 16mm lower than the Makkink reference evapotranspiration. For areas with a more diverse land cover the actual evapotranspiration is roughly 50mm lower than the reference evapotranspiration. For areas largely covered by woods this deviation is smaller (35mm lower than Makkink), and for areas largely built-up it is higher (88mm lower than Makkink). From an analysis of the possible applications it became apparent that the data can only be used for purposes where a general insight in the evaporation is needed and that the data can only be used on larger areas.

In conclusion the RS data can be looked upon as a good model for determining the evapotranspiration. Although the RS evaporation data can give an insight into the evapotranspiration in the area, users should be aware of the fact that drought is also affected by water supply and extractions that are not included in the evapotranspiration data. Also the data can only be used for larger areas. The main advantage of the RS evaporation data compared to Makkink, is that they give an accurate insight into the spatial differences in evapotranspiration.

When using the data, users should be aware of its limitations, especially the fact that the effects water supply and extractions will not be shown accurately by the data. It is recommended that future investigations into new sources of evapotranspiration images will start by examining the lineage of the data, even before the deviations compared to other methods are explored. It is unlikely however that these new sources will display the effect of soil moisture effectively, because the current generation of soil moisture sensors on board of satellites have very low spatial resolutions ($\geq 10\text{Km}$). Suppliers of evapotranspiration data with a higher spatial resolution could be found, however because the resolution of the soil moisture information will be low, this element will have a lower level of detail.

Voorwoord

Remote sensing technieken spelen in de Civiele Techniek een grote rol. Met de komst van steeds beter wordende apparatuur zullen de mogelijkheden van remote sensing in de toekomst steeds verder toenemen. Zelf ben ik met remote sensing technieken in aanraking gekomen door een minor 'Geo Data Processing & Spatial Information' te volgen. Ook is mijn interesse gedurende de opleiding Civiele Techniek voornamelijk uitgegaan naar het waterbeheer. In dit onderzoek, ter afronding van de bachelor opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente, heb ik beide onderwerpen kunnen combineren door onderzoek te doen naar de toegevoegde waarde van remotely sensed verdampingsgegevens. Ik heb dit onderzoek echter niet alléén uitgevoerd. Allereerst zou ik Marloes ter Haar willen bedanken voor dat ze mij de kans heeft gegeven dit onderzoek bij het Waterschap Groot Salland uit te voeren. Ook was haar goede begeleiding en feedback onmisbaar voor de uitvoering van het onderzoek, en de totstandkoming van dit eindrapport. Daarnaast zou ik Jord Warmink, begeleidend docent vanuit de Universiteit Twente, willen bedanken voor de begeleiding tijdens de uitvoering van de opdracht, en de waardevolle feedback die hij op meerdere momenten gedurende de opdracht gegeven heeft. Dit rapport is het eindresultaat van het onderzoek naar de remotely sensed verdampingsgegevens en geeft inzicht in de resultaten, conclusies en aanbevelingen van het uitgevoerde onderzoek.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1 Verdamping.....	2
1.2 Onderzoeksvragen.....	3
1.3 Leeswijzer	3
2. Studiegebied en gegevens	4
2.1 Studiegebied	4
2.2 Gegevens.....	4
3. Methode.....	5
3.1 Vraag 1: Kwaliteit remotely sensed verdampingsgegevens	5
3.2 Vraag 2: Nauwkeurigheid van RS ET_{pot} t.o.v. PM ET_{ref} voor puntmeting Heino.....	6
3.3 Vraag 3: Vergelijking ruimtelijke spreiding RS en PM potentiële verdamping	10
3.4 Vraag 4: Overeenkomsten RS verdampingstekort en KNMI neerslagtekort	10
3.5 Vraag 5: Verschillen bij overstap van Makkink ET_{ref} naar RS ET_{act}	11
3.6 Vraag 6: Mogelijke toepassingen van remotely sensed gegevens.....	11
4. Resultaten	12
4.1 Vraag 1: Kwaliteit remotely sensed verdampingsgegevens	12
4.2 Vraag 2: Nauwkeurigheid van RS ET_{pot} t.o.v. PM ET_{ref} voor puntmeting Heino.....	15
4.3 Vraag 3: Vergelijking ruimtelijke spreiding RS en PM potentiële verdamping	19
4.4 Vraag 4: Overeenkomsten RS verdampingstekort en KNMI neerslagtekort	20
4.5 Vraag 5: Verschillen bij overstap van Makkink ET_{ref} naar RS ET_{act}	22
4.6 Vraag 6: Mogelijke toepassingen van remotely sensed gegevens.....	23
5. Discussie	26
6. Conclusies en aanbevelingen.....	27
7. Referenties	29
Bijlagen.....	31
1. Gewasfactoren	32
2. Vergelijkingen Penman-Monteith en Makkink	34
3. Locaties kaarten.....	38

Variabelen en afkortingen:

Tabel 1: Gebruikte variabelen

Variabele	Term in dit rapport	Andere aanduidingen
Actuele dampspanning	e_a	
Actuele verdamping	ET_{act}	$ET_{c\ adj}$ (Allen et al. , 1998)
Albedo	α	
Breedtegraad	ϕ	
Buitenaardse-/Kortgolvlige-/Netto kortgolvlige straling	$R_a / R_s / R_{ns}$	(Opmerking: $R_s \approx Q$)
Determinatiecoëfficiënt	R^2	
Gemeten aantal zonuren/maximaal mogelijk zonuren	n/N	
Globale straling	Q	
Helling van de dampspanningscurve	Δ	δ (KNMI, 2005), s (Schuurmans et al. , 2010)
Hoek van de zon	ω_s	
Hoogte boven de zeespiegel	Z_{NAP}	
Hoogte boven maaiveld	Z_{mv}	
Inverse van het kwadraat van de relatieve aarde-zon afstand	d_r	
Luchtdruk	P	
Minimale/Maximale luchtvochtigheid	RH_{min} / RH_{max}	
Minimale/Maximale/gemiddelde temperatuur	$T_{min}, T_{max}, T_{gem}$	T_{mean} (Allen et al. , 1998)
Netto Straling	R_n	
Netto uitgaande langgolvlige straling	R_{nl}	
Nummer van de dag in het jaar, waarbij '1-1'=1 en '31-12'=365/366	J	
Onbewolkte zonnestraling	R_{so}	
Potentiële verdamping	ET_{pot}	ET_c (Allen et al. , 1998)
Psychrometerconstante	γ	
Referentieverdamping	ET_{ref}	ET_o (Allen et al. , 1998)
Soortelijke massa van water	ρ	
Verdampingstekort (deficit)	ET_d	
Verdampingswarmte van water	λ	
Verzadigingsdampspanning	e_s	
Windsnelheid op z meter boven maaiveld	u_z	

Tabel 2: Gebruikte afkortingen

Afkorting	Betekenis
act	Actueel/Actuele
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
MAD	Mean Absolute Deviation
Mak	Makkink
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NHI	Nationaal Hydrologisch Instrument
NS	Nash-Sutcliffe (-coëfficiënt)
PM	Penman-Monteith
pot	Potentieel/Potentiële
R^2	Determinatiecoëfficiënt
ref	Referentie
RMSD	Root Mean Square Deviation
RS	Remote Sensing / Remotely sensed
WGS	Waterschap Groot Salland

1. Inleiding

Als gevolg van klimaatverandering komen extreme omstandigheden, zoals wateroverlast of droogte, in toenemende mate voor. Dit betekent voor waterbeheerders dat zij te allen tijde inzicht moeten hebben in het functioneren van hun watersysteem. Vooral inzicht in de waterbalans is hierbij belangrijk. Deze waterbalans is de som van alle in- en uitgaande waterstromen voor een gebied. Denk hierbij bijvoorbeeld aan neerslag, verdamping, of het uitstromen van water via een rivier. Een manier om inzicht te krijgen in de waterbalans, die de laatste jaren steeds vaker wordt toegepast, is door gebruik te maken van remote sensing (RS). RS is het op afstand waarnemen van verschijnselen door bijvoorbeeld gebruik te maken van luchtfoto's, satellietbeelden of Radar-gegevens. Het voordeel ten opzichte van puntmetingen is dat er op deze manier gegevens beschikbaar zijn voor iedere plaats in een gebied en niet alleen voor enkele meetpunten.

Dit is ook één van de redenen waarom Waterschap Groot Salland (WGS), samen met andere waterschappen, deelneemt aan het 'SAT-WATER' samenwerkingsverband. Gezamenlijk worden er dagelijks RS gegevens over de actuele verdamping en het verdampingstekort ingekocht. Omdat WGS verantwoordelijk is voor de waterhuishouding binnen haar beheersgebied (figuur 1) en daarmee zorg draagt voor de waterveiligheid, de



Figuur 1: Het beheersgebied van WGS. Achtergrondkaart: ESRI (2014a)

waterkwaliteit en de aanvoer van water in dit gebied, is het belangrijk dat er inzicht is in de verdamping binnen het gebied. Het beheersgebied van WGS heeft een oppervlak van 120 000 hectare, waar ongeveer 360 000 mensen wonen (Waterschap Groot Salland, z.d.). Voor onder andere het operationeel peilbeheer, is het van belang dat er zo accuraat mogelijke verdampingsgegevens gebruikt worden, zeker als je bedenkt dat in Nederland ongeveer 70% van alle neerslag verdampt (DHV, 2012). In de dagelijkse praktijk wordt nog vaak gebruik gemaakt van gegevens die door het KNMI verzameld worden bij de meetlocatie Heino. WGS neemt hierbij aan dat voor het hele beheersgebied de verdamping gelijk is. Omdat het verschijnsel verdamping echter voor ieder landgebruik anders is en dus ruimtelijke verschillen vertoont, kan deze aanname tot afwijkingen leiden.

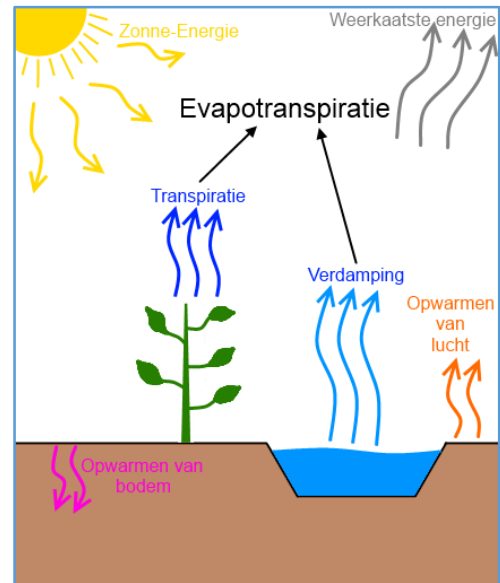
Tot op heden is er voor het beheersgebied van WGS nog geen onderzoek uitgevoerd naar de verschillen tussen de RS gegevens en de gegevens die door het KNMI verzameld worden. Omdat de verdamping een grote component op de waterbalans is, is het belangrijk om te onderzoeken of de RS verdampingsgegevens die ingekocht zijn via het 'SAT-WATER' samenwerkingsverband een beter beeld van de verdamping geven dan de methode die nu gebruikt wordt. Een inzicht in de karakteristieken van de RS verdampingsgegevens en de verschillen ten opzichte van de huidige bepalingmethoden, kan de toegevoegde waarde van de RS gegevens in beeld brengen. Indien blijkt dat de RS gegevens een beter inzicht geven in de verdamping, kan een overstap op deze gegevens overwogen worden. Dit leidt tot een situatie waarin watertekorten en wateroverlast beter voorspeld kunnen worden en het waterschap op een efficiëntere manier met het waterbeheer kan omgaan.

1.1 Verdamping

Verdamping is het proces waarbij water wordt omgezet naar waterdamp. Hierbij gaat het onder andere over verdamping van open water, natte gewassen en de ondergrond. Transpiratie is de verdamping van water dat zich in planten bevindt en door de huidmondjes de plant verlaat. Zowel voor verdamping van een oppervlak als transpiratie is energie nodig. De verdamping en transpiratie samen vormen de evapotranspiratie (ET) (Allen et al. , 1998). In het vervolg van dit rapport wordt deze evapotranspiratie als verdamping aangeduid.

Naast de evapotranspiratie, is ook de interceptieverdamping van belang. Dit is de neerslag die onderschept wordt door een oppervlak, zoals een plant, en vervolgens weer verdampt. Er bestaat echter geen duidelijk overzicht van de omvang van deze verdamping voor verschillende gewassen in verschillende groeistadia (Droogers, 2009). De interceptieverdamping wordt daarom niet berekend in dit onderzoek.

Vandaag de dag is er een veelvoud aan methoden beschikbaar om de verdamping te bepalen. Het uitgangspunt voor de meeste verdampingsmethoden is de energiebalans. Dit betekent dat de beschikbare zonnestraling gebruikt wordt voor 3 dingen, namelijk het opwarmen van de lucht, het opwarmen van de bodem en het verdampen van water (figuur 2). Veel methoden om de verdamping te bepalen trachten de zogenaamde 'verdampingsflux' te bepalen, om hieruit de omvang van de verdamping af te leiden (Droogers, 2009).



Figuur 2: De energiebalans

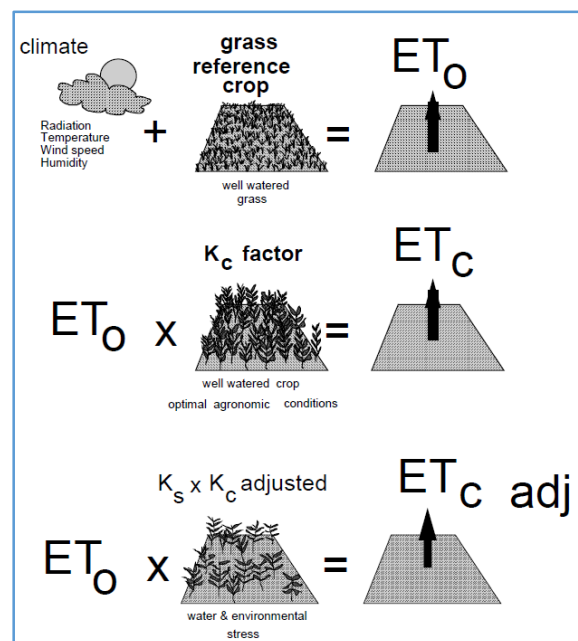
Referentieverdamping

De referentieverdamping is de evapotranspiratie die optreedt voor gras, in het geval dat er voldoende water beschikbaar is (ET_0 in figuur 3). De Makkink en Penman-Monteith methoden zijn voorbeelden van methoden die de referentieverdamping bepalen. De methode Makkink wordt in Nederland gebruikt door het KNMI. Voor het bepalen van de verdamping aan de hand van deze methode zijn alleen metingen van de globale straling en etmaalgemiddelde temperatuur nodig (KNMI, 2005). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat zonnestraling de grootste invloed heeft op de verdamping (TU Delft, 2011).

De Penman-Monteith methode neemt naast de straling en temperatuur, ook de windsnelheid en luchtvochtigheid mee bij het berekenen van de verdamping. De Penman-Monteith methode wordt internationaal vaak gebruikt en is onder andere door de Food and Agriculture Organization en de American Society of Civil Engineers aangenomen als standaardmethode (Allen et al. , 1998 ; Droogers, 2009). Droogers (2009) geeft aan dat de Penman-Monteith methode in wetenschappelijke literatuur vaak als meest nauwkeurige methode beschouwd wordt en in Nederland de discussie opgestart zou moeten worden om over te stappen op de Penman-Monteith methode. Daarnaast wordt in meerdere onderzoeken de Penman-Monteith methode als referentie gebruikt (De Melo et al. , 2012 ; Xu et al. , 2002). Ook in dit onderzoek wordt de Penman-Monteith methode als referentie toegepast. Deze methode kan op verschillende manieren, aan de hand van verschillende meetgegevens, doorgerekend worden. Bij dit onderzoek wordt de Penman-Monteith verdamping aan de hand van de methode van Allen et. al (1998) berekend, waarbij als invoer meteorologische gegevens van het KNMI gebruikt worden.

Potentiële verdamping

De potentiële verdamping is de evapotranspiratie die bij een optimale waterbeschikbaarheid optreedt, en verschilt per landgebruik. Om de potentiële verdamping te bepalen, wordt de referentieverdamping vermenigvuldigd met een gewasfactor (zie ET_c en K_c in figuur 3). Deze gewasfactor is per gewas verschillend en verschilt ook in de tijd. Voor



Figuur 3: De verschillende soorten verdamping: referentieverdamping (ET_0), potentiële verdamping (ET_c) en actuele verdamping (ET_c adj). K_c is de gewasfactor, en de factor K_s compenseert voor waterbeschikbaarheid en andere omgevingsfactoren. (Allen et al. , 1998)

de Makkink methode zijn gewasfactoren onder andere gegeven door Feddes (1987). De referentieverdamping is de verdamping voor gras bij een optimale waterbeschikbaarheid (figuur 3). De referentieverdamping is dus gelijk aan de potentiële verdamping voor gras.

Actuele verdamping

De actuele verdamping is de evapotranspiratie die werkelijk optreedt en is dus afhankelijk van de waterbeschikbaarheid (zie $ET_{c\ adj}$ in figuur 3). Ook is deze actuele verdamping afhankelijk van omgevingsfactoren. Zo groeien planten op vervuilde grond minder snel, en treedt hier dus minder verdamping op. Dit betekent dat de actuele verdamping van een gewas te allen tijde kleiner dan of gelijk aan de potentiële verdamping is. Allen et al. (1998) stellen voor om de potentiële verdamping om te rekenen naar actuele verdamping, door middel van een factor (zie K_s in figuur 3). Echter zijn voor een gedetailleerde inschatting van de actuele verdamping accurate gegevens over de toestand van het bodemvocht nodig, die vaak niet beschikbaar zijn.

Verdampingstekort

Het verschil tussen de potentiële en de actuele verdamping is het verdampingstekort. Dit is de hoeveelheid verdamping die niet heeft kunnen optreden als gevolg van een suboptimale waterbeschikbaarheid. Als het verdampingstekort bij de actuele verdamping opgeteld wordt, is het resultaat de potentiële verdamping.

1.2 Onderzoeksvragen

Voor de uitvoering van het onderzoek zijn een hoofdvraag en deelvragen opgesteld. De hoofdvraag die door dit onderzoek beantwoordt wordt is de volgende:

Hoe nauwkeurig zijn de remotely sensed (RS) verdampingsgegevens in verhouding tot de verdamping bepaald aan de hand van de methoden Makkink en Penman-Monteith en hoe goed weergegeven deze gegevens de ruimtelijke spreiding van de actuele verdamping?

Deze hoofdvraag wordt beantwoord, door de volgende deelvragen te beantwoorden:

1. Wat is de kwaliteit van de remotely sensed verdampingsgegevens?
2. Wat is de nauwkeurigheid van de RS potentiële verdamping ten opzichte van de Penman-Monteith referentieverdamping op de KNMI meetlocatie Heino?
3. Hoe verhoudt de RS potentiële verdamping zich tot de Penman-Monteith potentiële verdamping als er gekeken wordt naar de ruimtelijke spreiding?
4. Hoe verhoudt het RS verdampingstekort zich tot het KNMI neerslagtekort?
5. Hoe groot zijn de verschillen die optreden wanneer er van de Makkink referentieverdamping wordt overgestapt op de RS actuele verdamping?
6. Wat zijn de mogelijke toepassingen van de remotely sensed verdampingsgegevens?

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 richt zich op het studiegebied en de gegevens die gebruikt zijn. In hoofdstuk 3 wordt per deelvraag de gehanteerde methodiek besproken. Door deze methodiek te hanteren zijn onderzoeksresultaten verkregen die in hoofdstuk 4 gepresenteerd worden. Deze resultaten vormen de basis voor de discussie in hoofdstuk 5. Ten slotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen gegeven. De locaties van de detailkaarten die in dit verslag zijn weergegeven in bijlage 3.

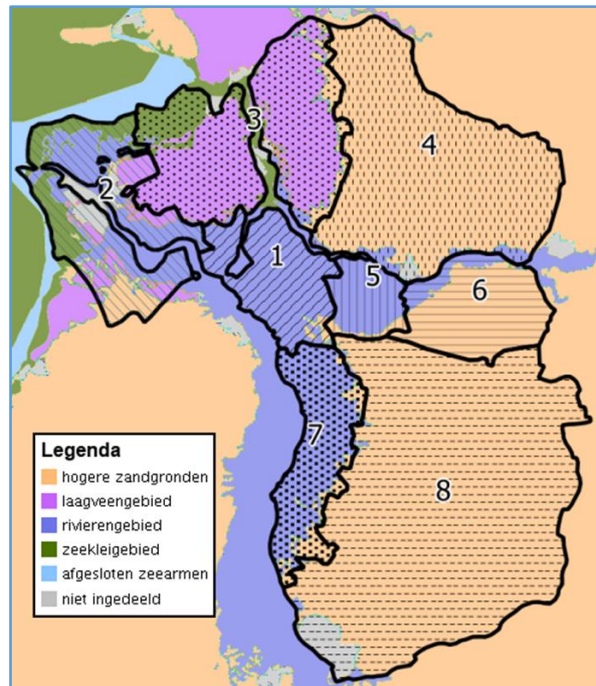
2. Studiegebied en gegevens

2.1 Studiegebied

Er wordt gekeken naar het beheersgebied van het Waterschap Groot Salland (figuur 1). Binnen dit beheersgebied is een gebiedsindeling op basis van bodemtypen gemaakt (figuur 4). Hiervoor is er gebruik gemaakt van de dataset fysisch geografische regio's (PDOK, 2013). Bodemtype is gekozen als criterium omdat het bodemtype een invloed heeft op de waterbeschikbaarheid en plantengroei in het gebied. Gebieden één en zes zijn niet gebaseerd op bodemtype, maar op landgebruik. Gebied één bestaat voornamelijk uit stedelijk gebied, en gebied zes bestaat voor een groot deel uit bos. De verwachting is dat de verdamping voor stedelijk gebied lager uitvalt, en de verdamping voor bos hoger uitvalt ten opzichte van de verdamping voor grasland. Door enkele gebieden afwijkend in te delen, wordt ook de invloed van het landgebruik of de verdamping bekeken.

2.2 Gegevens

De toegepaste rasterbestanden met verdampingsgegevens zijn afkomstig van het bedrijf eLeaf. Deze bestanden worden aangeleverd in NetCDF-formaat en hebben een resolutie van 250 bij 250m. Er zijn bestanden beschikbaar over de actuele verdamping en het verdampingstekort in Nederland. Aan de hand van deze gegevens zijn rasterbestanden met de potentiële verdamping afgeleid. De herkomst van deze gegevens komt in hoofdstuk 4.1 aan bod.



Figuur 4: Gebiedsindeling op basis van bodemtypen. Gebied één en zes zijn ingedeeld op basis van landgebruik. Elk gebied is genummerd.

Meteorologische gegevens zijn afkomstig van het KNMI. Gegevens over de gemiddelde windsnelheid, minimale, gemiddelde en maximale temperatuur, de minimale en maximale luchtvochtigheid, de neerslag en de globale straling voor de meetlocaties Heino en Hoogeveen zijn gebruikt. Daarnaast zijn meteorologische gegevens over de hoeveelheid bewolking voor vier meetlocaties rondom het gebied gebruikt: Twenthe, Hoogeveen, Deelen en Lelystad.

De potentiële verdamping aan de hand van de Penman-Monteith (PM) methode is bepaald door gewasfactoren van Droogers (2009) toe te passen. Om de gewasfactoren per gebied te bepalen is gebruik gemaakt van de dataset bodemgebruik 2008 (CBS, 2011) en de dataset BRP gewaspercelen (PDOK, 2013).

Het groeiseizoen 2013, van 1 april tot en met 30 september, is beschouwd. Voor deze periode zijn al de hierboven besproken gegevens beschikbaar. Er is gekozen voor een groeiseizoen omdat een onjuiste waterverdeling juist dan kan leiden tot droogteschade. In enkele gevallen is ter referentie ook naar gegevens over het groeiseizoen 2012 gekeken.

3. Methode

3.1 Vraag 1: Kwaliteit remotely sensed verdampingsgegevens

Om de kwaliteit van de RS gegevens te bestuderen vindt een beoordeling van de gegevens plaats op basis van de elementen van ruimtelijke-data kwaliteit (Elements of spatial data quality). Van Oort (2006) geeft de volgende elementen:

Tabel 3: Elements of spatial data quality (Van Oort, 2006), met Nederlandse vertaling

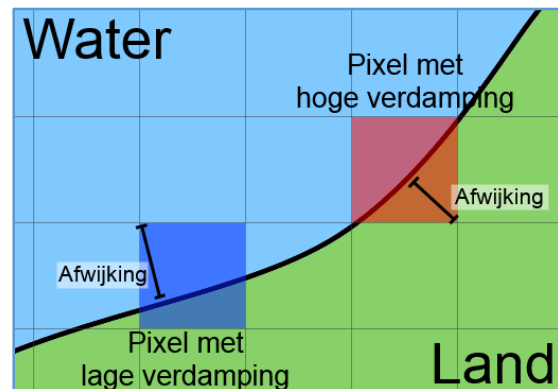
	Engelse term	Nederlandse vertaling
1	Lineage	Herkomst
2	Positional accuracy	Positionele nauwkeurigheid
3	Attribute accuracy	Kenmerk nauwkeurigheid
4	Logical consistency	Logische samenhang
5	Completeness	Compleetheid
6	Semantic accuracy	Semantische nauwkeurigheid
7	Usage, purpose, constraints	Gebruik, doel, randvoorwaarden
8	Temporal quality	Temporele kwaliteit
9	Variation in quality	Variatie in kwaliteit
10	Meta-quality	Meta-kwaliteit
11	Resolution	Resolutie

Herkomst

Er is gekeken naar de 'geschiedenis' van de gegevens. Hiervoor is onderzocht welke brongegevens gebruikt zijn en welke bewerkingen hierop gedaan zijn om tot de verdampingsgegevens te komen.

Positionele nauwkeurigheid

Om een eerste inschatting te maken van de positionele nauwkeurigheid is er gekeken naar grenzen tussen water en land, omdat deze duidelijk waar te nemen zijn in de verdampingsgegevens. Er is gebruik gemaakt van een verdampingsbeeld met cumulatieve gegevens ten aanzien van de actuele verdamping over het groeiseizoen 2013. Ter referentie is een luchtfoto (ESRI, 2014) gebruikt. Er is gekeken hoeveel de overlap is tussen pixels met een lage verdamping en water, en pixels met een hoge verdamping en land (figuur 5). De maximale afwijking wordt bepaald door de grens tussen water en land langs te gaan en te kijken waar de grootste afwijking optreedt. Ook is er gekeken naar de gemiddelde afwijking. Omdat het beschouwen van elke afzonderlijke afwijking voor elke pixel die in het gebied op een waterrand ligt te veel tijd in beslag neemt, is er een ruwe schatting gemaakt van dit gemiddelde.



Figuur 5: Bepaling van positionele nauwkeurigheid. Afstand wordt haaks op waterrand gemeten.

Kenmerk nauwkeurigheid

De kenmerk nauwkeurigheid is de nauwkeurigheid van alle kenmerken die de data probeert over te brengen. In dit onderzoek gaat het hierbij alleen om de hoogte van de actuele verdamping en het verdampingstekort. Omdat de nauwkeurigheid hiervan onderzocht wordt in volgende deelvragen, is voor deze vraag geen verdere bespreking van de Kenmerk nauwkeurigheid uitgevoerd.

Logische samenhang

Om de logische samenhang te beoordelen, is de consistentie binnen de dataset met verdampingsgegevens beoordeeld. Dezelfde eenheden en termen moeten consistent gebruikt worden. Het resultaat is een korte bespreking van de samenhang binnen de dataset.

Compleetheid

Er is onderzocht of de dataset een compleet beeld van de verdamping in het gebied geeft. Hiervoor is de aanwezigheid van 'NODATA' pixels onderzocht. Ook is er gekeken of voor elk moment in het groeiseizoen remotely sensed gegevens beschikbaar zijn.

Semantische nauwkeurigheid

Voor de gebruikers van de gegevens is de semantische nauwkeurigheid van belang. Dit betekent dat beschrijvingen zo ondubbelzinnig mogelijk gedefinieerd moeten zijn en er dus geen twijfel mag bestaan over de betekenis van de gebruikte termen. Er is gekeken of de gebruikte termen consistent dezelfde betekenis hebben in de literatuur.

Gebruik, doel en randvoorwaarden

Het beoogde gebruik en doel van de dataset zijn beschouwd. Daarnaast wordt er aangegeven welke randvoorwaarden er zijn bij het gebruiken van de gegevens. Dit is onder andere afhankelijk van de overeenkomst die gesloten is met de leverancier.

Temporele kwaliteit

Voor het bepalen van de temporele kwaliteit zijn enkele elementen belangrijk, namelijk de nauwkeurigheid van de tijdmetingen, de temporele validiteit, de temporele samenhang en de verandering in het verschijnsel. Nauwkeurigheid van de tijdmetingen betekent dat als aangegeven wordt dat de gegevens afkomstig zijn van een zekere periode, de gegevens ook echt van deze periode afkomstig moeten zijn. Hiervoor is onder andere de gebruikte tijdszone van belang. De temporele validiteit is ook belangrijk. Zo moet er gekeken worden of het terecht is dat metingen op één tijdstip geëxtrapoleerd worden naar dagelijkse intervallen. Temporele samenhang is belangrijk bij de interpretatie van de data. Zo is het logisch dat alle gegevens betrekking hebben op een interval van dezelfde duur. Als laatste moet inzicht in de verandering van het weergegeven fenomeen verkregen worden. Dit heeft samenhang met de eerder besproken temporele validiteit. Als er namelijk veel verandering waarneembaar is voor het fenomeen, betekent dit dat een meetwaarde voor één tijdstip niet representatief is voor een hele dag.

Variatie in kwaliteit

Er is gekeken naar zowel de ruimtelijke variatie van de kwaliteit, als de variatie van de kwaliteit in de tijd. Zo moet duidelijk worden of de gegevens voor de ene plek in het gebied betrouwbaardere resultaten geven dan voor een andere plek en of het gebruikte model voor de éne periode betere schattingen geeft dan voor de andere.

Meta-kwaliteit

De kwaliteit van de metadata, de beschrijvende gegevens bij een dataset, is besproken. Hierbij is gekeken naar de metadata zoals die in de huidige situatie beschikbaar is. Omdat ArcGIS niet alle metadata inleest, is 'NetCDF Tools' gebruikt om alle metadata van de bestanden te weergeven.

Resolutie

Als laatste wordt de resolutie van de verdampingsgegevens besproken. Hierbij is verder ingegaan op de implicaties van deze resolutie op toekomstig gebruik.

3.2 Vraag 2: Nauwkeurigheid van RS ET_{pot} t.o.v. PM ET_{ref} voor puntmeting Heino

Om te bepalen of de remotely sensed gegevens de potentiële verdamping (actuele verdamping + verdampingstekort) in het gebied goed weergeven, is de RS Potentiële verdamping (ET_{pot}) voor puntmetingen vergeleken met de PM referentieverdamping (ET_{ref}). Omdat er voor het beheersgebied van het Waterschap Groot Salland geen meetgegevens beschikbaar zijn over de verdamping, wordt ter referentie gebruik gemaakt van de Penman-Monteith methode op basis van meteorologische variabelen (zie paragraaf 1.2). De meetlocatie Heino wordt beschouwd, omdat dit de enige KNMI meetlocatie binnen het beheersgebied van WGS is. Meetgegevens voor de meetlocatie Hoogeveen worden ter verificatie van de resultaten op meetlocatie Heino toegepast. Omdat veel RS waarnemingen hinder ondervinden van bewolking, wordt ook een vergelijking gemaakt tussen de afwijkingen op bewolkte en onbewolkte dagen, om de betrouwbaarheid van RS op bewolkte dagen te kwantificeren.

3.2.1 Bepalingsmethoden

Vergelijking 1 toont de formule die gebruikt wordt om de verdamping aan de hand van de methode Makkink te bepalen. Vergelijking 2 toont de formule voor de Penman-Monteith methode.

De Makkink referentieverdamping wordt bepaald aan de hand van de gemiddelde temperatuur en de globale straling. Volgens Allen et al. (1998) kunnen zowel het aantal zonuren als de globale straling gebruikt worden om de Penman-Monteith referentieverdamping te bepalen. Schuurmans et al. (2010) geven aan dat de Penman-Monteith verdamping in Nederland het best berekend kan worden aan de hand van de globale straling. Ook wordt er voor de Penman-Monteith methode gebruik gemaakt van de minimale en maximale temperatuur, de minimale en maximale luchtvochtigheid en de gemiddelde windsnelheid.

In beide formules worden de 'helling van de dampspanningscurve' en de 'psychrometerconstante' gebruikt. Deze worden echter voor elke methode op een andere manier berekend. Zo is de psychrometerconstante bij Makkink alléén afhankelijk van de gemiddelde temperatuur op een dag, waar deze bij de Penman-Monteith methode afhankelijk is van de hoogte van het meetpunt. Omdat veel verschillende formules nodig zijn om de variabelen in vergelijking 1 en 2 te bepalen, zijn deze formules in bijlage 2 opgenomen.

$$ET_{ref} = \frac{1000 * 0,65 * \Delta}{(\Delta + \gamma) * \rho * \lambda} * Q$$

Waarin:

ET _{ref}	Referentieverdamping (mm)
Δ	Helling van de dampspanningscurve [hPa/°C]
γ	Psychrometerconstante [hPa/°C]
ρ	Soortelijke massa van water [kg/m ³] (1000)
Q	Globale straling gemeten door KNMI [J/m ²]

Vergelijking 1 (KNMI, 2005)

$$ET_{ref} = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_{gem} + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34u_2)}$$

Waarin:

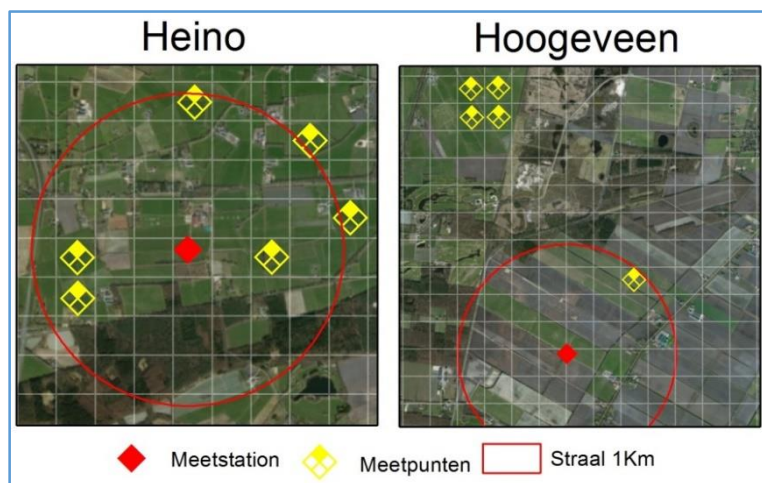
ET _{ref}	Referentieverdamping (mm)
Δ	Helling van de dampspanningscurve [hPa/°C]
R _n	Netto straling [MJ / m ² /dag]
G	Bodem warmteflux [MJ / m ² /dag]
γ	Psychrometerconstante [hPa/°C]
T _{gem}	Gemiddelde temperatuur, bepaald uit T _{min} en T _{max} [°C]
u ₂	Windsnelheid op 2 m hoogte [m/s]
e _s	Verzadigingsdampdruk [kPa]
e _a	Actuele dampdruk [kPa]

Vergelijking 2 (Allen et al. , 1998)

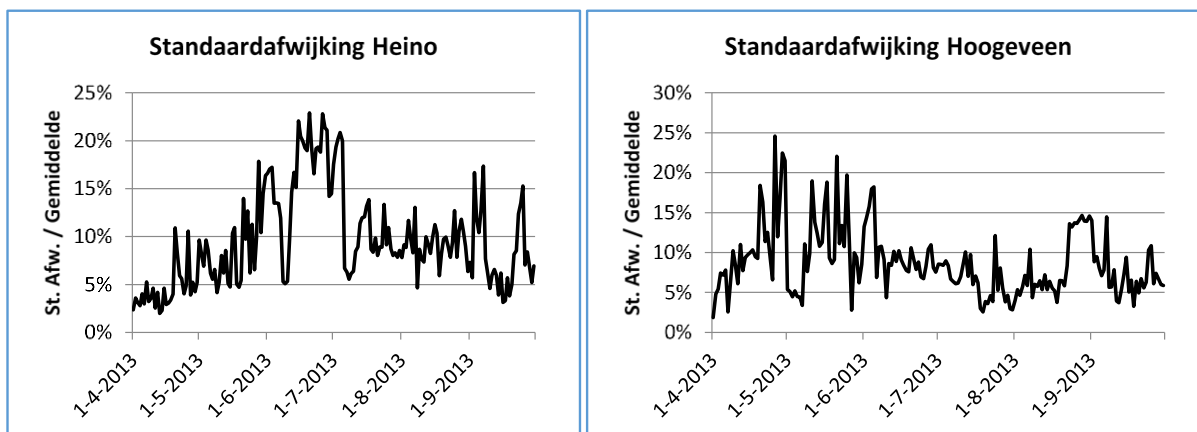
3.2.2 Pixelkeuze

Om de vlak dekkende RS gegevens te kunnen vergelijken met puntgegevens, is bepaald welke pixels gebruikt gaan worden in de vergelijking. Omdat de bepalingmethoden als referentiegewas gras gebruiken, is er gezocht naar pixels die voor een groot deel (>90%) uit gras bestaan. Vanwege de lage resolutie (250m) zijn er geen pixels die volledig uit gras bestaan, omdat er altijd een weg of bomenrij het gebied doorkruist.

In de omgeving van het meetstation Heino zijn meerdere pixels gevonden die aan de criteria voldoen (figuur 6). Deze liggen binnen 1km omtrek van de KNMI meetlocatie. Ook in Hoogeveen zijn meerdere pixels gevonden (figuur 6). Deze bevinden zich echter op grotere afstand van de meetlocatie, aangezien er minder pixels met gras rondom het meetpunt aanwezig zijn. Voor Heino zijn uiteindelijk zes punten gekozen en voor Hoogeveen vijf. Om de variabiliteit in de dagelijkse waarden van deze pixels te bepalen, is er gekeken naar de dagelijkse standaardafwijking in de gekozen pixels. Omdat de hoogte van de verdamping van dag tot dag grote verschillen vertoont, is de standaardafwijking gedeeld door het dagelijks gemiddelde van de meetpixels (figuur 7).



Figuur 6: Pixels ter bepaling van de RS verdamping voor de meetlocaties Heino en Hoogeveen. Resolutie: 250m. Zie voor locaties van afbeeldingen bijlage 3. Luchtfoto: (ESRI, 2014b)



Figuur 7: Standaardafwijking in de dagelijkse RS ET_{pot} van de meetpixels, gedeeld door de gemiddelde dagelijkse RS ET_{pot} van de meetpixels

Hoewel de Standaardafwijking voor beide stations voor een groot deel van het jaar rond de 10% van de gemiddelde waarde van de meetpunten op die dag ligt, worden er grote uitschieters waargenomen. Zo ligt de standaardafwijking op enkele dagen rond de 25% procent. Dit zou betekenen dat het 95% betrouwbaarheidsinterval ($\approx 2 \times$ standaardafwijking) tussen de 50% en 150% van de gemiddelde waarde ligt. In de meeste gevallen ligt dit interval rond de 80% tot 120%. Het gebruiken van één pixel voor het bepalen van de verdamping geeft dus teveel onzekerheid. Daarnaast hebben fouten in één pixel dan een grote impact op het eindresultaat. Om deze reden worden de gemiddelde waarden van de 5 (Hoogeveen) of 6 (Heino) pixels gebruikt, in tegenstelling tot de waarde van één enkele pixel.

3.2.3 Bepaling afwijkingen

De gemiddelde dagelijkse RS ET_{pot} van de meetpunten, wordt vergeleken met de dagelijkse PM ET_{ref}, bepaald aan de hand van meteorologische gegevens van KNMI meetstation Heino. Bij deze vergelijking worden de determinatiecoëfficiënt (R^2 , Vgl. 3), de Root Mean Square Deviation (RMSD, Vgl. 4), de Nash-Sutcliffe coëfficiënt (NS, Vgl. 5) en de Mean Absolute Deviation (MAD, Vgl. 6) bepaald. De determinatiecoëfficiënt geeft alléén de mate van correlatie tussen de datasets weer en kan dus alleen de algemene trends vergelijken. Absolute afwijkingen worden door de determinatiecoëfficiënt niet inzichtelijk gemaakt. De RMSD en NS geven wel inzicht in de absolute afwijkingen tussen de geobserveerde gegevens en de gemodelleerde gegevens. Hierbij duidt een NS-waarde van één op een perfecte fit, net als een RMSD van 0. In tegenstelling tot de RMSD hoeft een 0 waarde van de MAD niet te duiden op een perfecte fit. Positieve en negatieve waarden zorgen namelijk voor een middeling. De MAD biedt alléén inzicht in de gemiddelde afwijking die optreedt. Samen met een Spreidingsdiagram kan beoordeeld worden of het hier om een systematische afwijking gaat.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (x_o^t - \bar{x}_o)(x_m^t - \bar{x}_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_o^t - \bar{x}_o)^2 \sum_{t=1}^n (x_m^t - \bar{x}_m)^2}}$$

Waarin:

R^2	Determinatiecoëfficiënt (-)
n	Steekproefgrootte (-)
x_o^t	Geobserveerde waarde voor tijdstip t (mm)
x_m^t	Gemodelleerde waarde voor tijdstip t (mm)
\bar{x}_o	Gemiddelde geobserveerde waarde (mm)
\bar{x}_m	Gemiddelde gemodelleerde waarde (mm)

Vergelijking 3

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_o^t - x_m^t)^2}{n}}$$

Waarin:

RMSD	Root Mean Square Deviation (mm)
n	Steekproefgrootte (-)
x_o^t	Geobserveerde waarde voor tijdstip t (mm)
x_m^t	Gemodelleerde waarde voor tijdstip t (mm)

Vergelijking 4

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (x_o^t - x_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (x_o^t - \bar{x}_o)^2}$$

Waarin:

E	Nash-Sutcliffe coëfficiënt (-)
x_o^t	Geobserveerde waarde voor tijdstip t (mm)
x_m^t	Gemodelleerde waarde voor tijdstip t (mm)
\bar{x}_o	Gemiddelde geobserveerde waarde (mm)

Vergelijking 5

3.2.4 Verschil tussen bewolkte en onbewolkte dagen

Omdat op de meetlocatie Heino de bedekkingsgraad van de bewolking niet gemeten wordt, is er voor het bepalen van de hoeveelheid bewolking gekeken naar andere KNMI meetlocaties. Meetlocaties die het gebied omringen, en de hoeveelheid bewolking meten, zijn gekozen om de hoeveelheid bewolking in het gebied te bepalen. Er wordt vanuit gegaan dat als alle stations die het gebied omringen bewolking detecteren, het gebied ook daadwerkelijk bewolkt is. De meetlocaties waarvan de gegevens gebruikt zijn, zijn weergegeven in figuur 8.

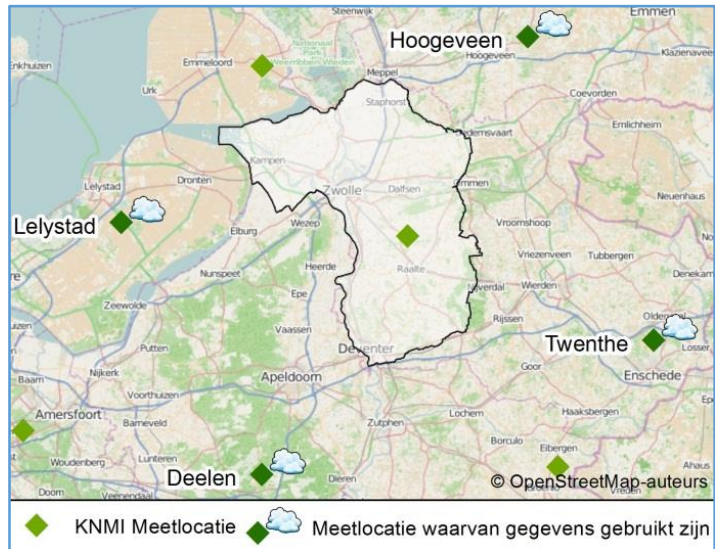
$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n (x_o^t - x_m^t)}{n}$$

Waarin:

MAD	Mean Absolute Deviation (mm)
n	Steekproefgrootte (-)
x_o^t	Geobserveerde waarde voor tijdstip t (mm)
x_m^t	Gemiddelde waarde voor tijdstip t (mm)

Vergelijking 6

Dagen zijn geclassificeerd als bewolkt of onbewolkt aan de hand van gegevens over de gemiddelde bedekkingsgraad. Deze heeft een schaal van 0 tot 8, waarbij 0 staat voor onbewolkt en 8 voor geheel bewolkt. Dagen waarop de bedekkingsgraad op alle omringende stations lager was dan 2, worden in dit onderzoek als onbewolkt aangemerkt. Dagen waarvoor alle stations een bewolgingsgraad groter dan 6 noteerden, worden aangemerkt als volledig bewolkte dagen. Dagen waarop de waarde van bedekkingsgraad tussen de 2 en 6 lag zijn niet gebruikt in deze vergelijking.



Figuur 8: De meetlocaties waarvan de bewolgingsgegevens gebruikt worden omringen het beheersgebied van WGS

Voor deze deelvraag zijn de RS ET_{pot} en PM ET_{ref} voor de locaties Heino en Hoogeveen gebruikt, waarbij Hoogeveen alleen gebruikt wordt om de resultaten voor Heino te verifiëren. Per dag is de afwijking tussen de gemiddelde RS ET_{pot} voor de meetpixels en berekende PM ET_{ref} bepaald. Voor de bewolkte en onbewolkte dagen zijn de R^2 , RMSD, NS coëfficiënt en MAD bepaald. Om te verifiëren of er geen grote verschillen optreden ten opzichte van de voorafgaande en opvolgende dagen, is er ook gekeken naar het verloop van de verdamping over een periode met zowel volledige bewolking als onbewolkte momenten.

Daarnaast is een T-toets uitgevoerd om te bepalen of de RS ET_{pot} en de PM ET_{ref} significant verschillen als de afwijkingen tussen de methoden voor onbewolkte dagen met die van bewolkte dagen vergeleken worden. Omdat het aantal onbewolkte dagen in de periode april tot en met september 2013 kleiner dan 30 is, is een T-toets toegepast. Omdat het mogelijk is dat er op onbewolkte dagen kleinere verschillen zouden optreden dan op bewolkte dagen, kon er niet verondersteld worden dat de standaardafwijkingen voor de bewolkte en onbewolkte dagen gelijk zouden zijn. Daarom is een aangepaste variant van de toetsingsgroottheid gebruikt (Vergelijking 7) (McClave et al., 2011). Er is een 95% betrouwbaarheidsinterval toegepast. De kritieke waarde voor 15 vrijheidsgraden is hierbij 2,131.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Het aantal vrijheidsgraden:

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1 - 1} \left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2 - 1} \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}$$

Waarin:

\bar{x}_a	Gemiddelde van gegevensverzameling a
D_0	veronderstelde afwijking nulhypothese (=0)
s_a^2	Variantie van gegevensverzameling a
n_a	Aantal waarnemingen in gegevensverzameling a

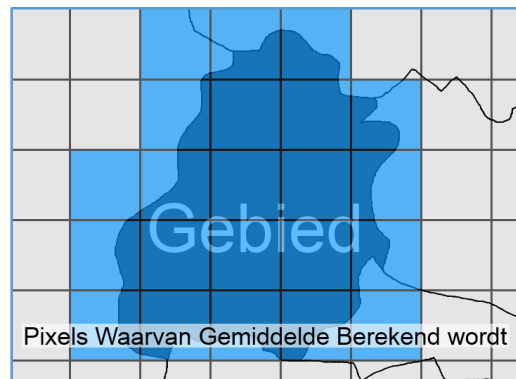
Vergelijking 7 (McClave et al., 2011)

3.3 Vraag 3: Vergelijking ruimtelijke spreiding RS en PM potentiële verdamping

De voorgaande deelvraag maakt gebruik van puntmetingen om een vergelijking te maken. Om de ruimtelijke spreiding van de gegevens te beoordelen is er gekeken naar de afwijkingen die optreden tussen de methoden als hele gebieden beschouwd worden in tegenstelling tot puntwaarnemingen. Hiervoor is de referentieverdamping op basis van de methode Penman-Monteith omgezet naar potentiële verdamping, door gebruik te maken van gewasfactoren.

Er is per deelgebied een vergelijking gemaakt tussen de PM potentiële verdamping en de RS potentiële verdamping. Om de representatieve gewasfactor per gebied te bepalen zijn bodemgebruiksgegevens toegepast (Zie hoofdstuk 2.2). Aan elk type landgebruik is een gewasfactor gekoppeld (Bijlage 1). Door de ratio van het landgebruik te vermenigvuldigen met de bijbehorende gewasfactor, en dit voor elk landgebruik te doen, is de representatieve gewasfactor per deelgebied bepaald. Door deze gewasfactor te vermenigvuldigen met de referentieverdamping, is uiteindelijk de PM potentiële verdamping per deelgebied verkregen. Dit is voor elke dag in het groeiseizoen gedaan. Er wordt aangenomen dat de Makkink-gewasfactoren ook van toepassing zijn op de Penman-Monteith methode, aangezien beide methoden de referentieverdamping voor gras bepalen.

De RS ET_{pot} zou in eerste instantie per deelgebied uit het web portal HydroNET geëxporteerd worden. Vanuit HydroNET kan per peilgebied de gemiddelde dagelijkse RS ET_{act} en verdampingstekort (ET_{def}) geëxporteerd worden. Vervolgens kan door deze twee bij elkaar op te tellen de potentiële verdamping berekend worden. Omdat HydroNET voor 29 september 2013 echter foutieve waarden bevatte, waardoor het verdampingstekort voor één peilgebied zelfs opliep tot 500mm, zijn de gegevens handmatig geëxporteerd. Hiervoor is in ArcGIS de functie 'Zonal Statistics as table' gebruikt. Het nadeel van de 'Zonal statistics' functie is dat van alle pixels die het gebied snijden, de gemiddelde waarde wordt berekend (figuur 9). Omdat ook de pixels aan de rand van het gebied hierbij helemaal meegeteld worden, kan er een afwijking ontstaan. Echter is het oppervlakte van de deelgebieden die voor dit onderzoek gebruikt worden (Zie hoofdstuk 2.1) vele malen groter is dan de oppervlakte van een pixel. Daarom wordt aangenomen dat het gevolg van deze berekeningsfout verwaarloosbaar is.



Figuur 9: De functie 'zonal statistics' neemt een te groot deel van de pixels aan de rand van het gebied mee, waardoor een fout in het berekende gemiddelde ontstaat

De RS ET_{pot} en PM ET_{pot} zijn met elkaar vergeleken om een uitspraak te doen over de overeenkomsten tussen de methoden. Naast cumulatieve grafieken, zijn per deelgebied de R^2 , RMSD, NS en de MAD berekend.

3.4 Vraag 4: Overeenkomsten RS verdampingstekort en KNMI neerslagtekort

Een groot voordeel van het gebruik van de remotely sensed gegevens zou voort moeten komen uit het feit dat de remotely sensed verdampingsgegevens ook inzicht geven in de actuele verdamping. Om te bepalen of de actuele verdamping op een goede manier bepaald wordt, wordt het verdampingstekort op basis van remote sensing vergeleken met het neerslagtekort aan de hand van KNMI gegevens.

De actuele verdamping kan niet rechtstreeks vergeleken worden met het neerslagtekort. De reden hiervoor is dat de actuele verdamping berekend wordt door het verdampingstekort van de potentiële verdamping af te trekken. Hierbij corrigeert het verdampingstekort voor een eventueel watern tekort. Doordat het verdampingstekort dus een maat voor droogte is, kan deze vergeleken worden met het neerslagtekort, dat ook een maat voor droogte is. Dit neerslagtekort is het doorlopende tekort dat ontstaat wanneer de dagelijkse verdamping, van de dagelijks gevallen neerslag afgetrokken wordt. Hiervoor gebruikt het KNMI de verdamping die berekend is aan de hand van de methode Makkink. Dit cumulatieve tekort kan niet negatief worden en zal dus voor perioden met veel regenval nul worden. In tegenstelling tot het neerslagtekort, kan het verdampingstekort niet dalen bij veel neerslag. De dagelijkse actuele verdamping kan immers nooit hoger worden dan de potentiële verdamping, waardoor een verdampingstekort ontstaan op een droge dag, niet kan worden 'ingelopen' door een natte dag. Bij de directe vergelijking tussen het cumulatieve neerslagtekort en het cumulatieve verdampingstekort wordt hier rekening mee gehouden door negatieve waarden voor het KNMI neerslagtekort te filteren, en deze door 0 te vervangen. Hierdoor kunnen de algemene trends vergeleken worden.

De hoogte van het neerslagtekort en het verdampingstekort is zeer verschillend. Dit komt onder andere door het feit dat er bij de berekening van het neerslagtekort vanuit wordt gegaan dat er geen water beschikbaar is uit voorgaande maanden. Onder andere hierdoor is het verdampingstekort aanzienlijk lager dan het neerslagtekort. De absolute verschillen tussen het KNMI neerslagtekort en het RS verdampingstekort worden daarom niet bepaald. Wel zullen de trends vergeleken worden door middel van grafieken. Naast een vergelijking op basis van grafieken, diagrammen en de R^2 , is ook de structuur van de verdampingsbeelden beoordeeld.

3.5 Vraag 5: Verschillen bij overstap van Makkink ET_{ref} naar RS ET_{act}

Voor het beantwoorden van deze deelvraag is er een vergelijking gemaakt tussen de referentieverdamping aan de hand van de methode Makkink en de actuele verdamping aan de hand van remote sensing. De referentieverdamping en de actuele verdamping zijn echter 2 verschillende begrippen. Er wordt dus ook alléén een uitspraak gedaan over de verschillen die optreden bij een overstap naar de remotely sensed gegevens. Deze vergelijking dient niet als verificatie of validatie van de remotely sensed gegevens.

Naast een vergelijking voor de KNMI meetlocatie Heino en een vergelijking waarbij gekeken wordt naar de verschillende deelgebieden, is er ook een rasterbestand gemaakt om per pixel in het studiegebied de verschillen tussen de Makkink referentieverdamping en de RS actuele verdamping inzichtelijk te maken. Bij deze vergelijking worden alleen voor de meetlocatie Heino de R^2 , RMSD, de NS en de MAD bepaald. Deze resultaten worden uitsluitend gebruikt om inzicht te geven in de overeenkomsten en verschillen tussen de methoden, en zullen niet ter verificatie gebruikt worden. Aan de hand hiervan wordt beoordeeld of er sprake is van een systematische afwijking, waardoor bijvoorbeeld de ene waarde gebruikt kan worden om de ander te voorspellen.

3.6 Vraag 6: Mogelijke toepassingen van remotely sensed gegevens

Voor WGS is inzicht in de toepasbaarheid van RS gegevens belangrijk. Hiervoor is allereerst gekeken welke mogelijke toepassingen van de RS gegevens binnen het 'SAT-WATER' samenwerkingsverband geopperd zijn. Deze toepassingen zijn vervolgens stuk voor stuk besproken aan de hand van de uitkomsten van voorgaande deelvragen. Er wordt aangegeven of de RS gegevens geschikt zijn voor de geopperde toepassingen.

4. Resultaten

4.1 Vraag 1: Kwaliteit remotely sensed verdampingsgegevens

Herkomst

Voor het bepalen van de verdamping maakt eLeaf gebruik van het 'ET Tool' (Voormalig ETLook) algoritme. Voor de gegevens die geleverd worden aan 'SAT-WATER' is er gebruik gemaakt van meteorologische variabelen om de hoeveelheid bodemvocht te bepalen (Dit in tegenstelling tot andere onderzoeken waarbij er gebruik gemaakt werd van satellietobservaties van de AMSR-E of ASCAT sensoren (Bastiaanssen et al. , 2012 ; Simons et al. , 2012)). Dit bodemvocht wordt gebruikt om een indicatie van de waterbeschikbaarheid en daarmee de hoogte van de actuele verdamping te geven. Voor het bepalen van de verdamping wordt er ook gebruik gemaakt van de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) en het albedo. Het NDVI geeft een indicatie van de dichtheid van groene begroeiing (NASA, z.d.) en het albedo geeft aan welk deel van de inkomende zonnestraling gereflecteerd wordt. De NDVI wordt in het model gebruikt om de vegetatiedekking te bepalen en het albedo om de netto-straling te bepalen (Bastiaanssen et al. , 2012). Zowel het NDVI als het albedo zijn afkomstig van de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Ook (onbekende) landgebruiks- en bodembestanden worden gebruikt, evenals meteorologische gegevens. (E. Bastidas Obando, Persoonlijke mededeling, 3 juni 2014). Deze meteorologische gegevens zijn afkomstig van het KNMI (Schuurmans et al. , 2010).

In tegenstelling tot andere bepalingsmethoden voor de actuele verdamping op basis van RS, wordt er voor het 'ET Tool' algoritme geen gebruik gemaakt van thermische infraroodbeelden, omdat deze te veel hinder ondervinden van bewolking. De MODIS gegevens waarvan het NDVI en het albedo wordt afgeleid, ondervinden ook hinder van bewolking, maar het NDVI en albedo kunnen ook uit andere databronnen afgeleid worden. Daarnaast ontwikkelen het NDVI en het albedo zich in tegenstelling tot de temperatuur zeer geleidelijk, waardoor het extrapoleren van deze waarden mogelijk is (Pelgrum et al. , 2010).

Tabel 4: Gebruikte invoergegevens voor de RS verdampingsgegevens

Invoer	Gegevensbron	Resolutie
NDVI	MODIS	250m
Albedo	MODIS	500m
Bodemvochtgehalte	Meteorologische gegevens (KNMI)	(puntmetingen)
Landgebruik en bodemtype	(Onbekend)	(Onbekend)
Overige invoer	Meteorologische gegevens (KNMI)	(puntmetingen)

De meteorologische variabelen (puntmetingen) worden geïnterpoleerd door gebruik te maken van het door eLeaf ontwikkelde 'MeteoLook' algoritme. Hierdoor zijn er voor elke plek in het gebied meteorologische gegevens beschikbaar (Simons et al., 2012). De albedo en NDVI beelden, afkomstig van MODIS, worden als 16-dagen composietbeelden aangeleverd. De afzonderlijke satellietobservaties over die 16-dagen worden door middel van 'maximum value compositing' omgezet naar composietbeelden. Dit betekent dat pixels in de composietbeelden de hoogst waargenomen NDVI voor die locatie over de laatste 16 dagen bevatten (Huete et al. , 1999). Deze composietbeelden over de laatste 16 dagen, worden elke 8 dagen beschikbaar gesteld. De hoogst beschikbare resolutie is voor het albedo 500m en voor de NDVI 250m (USGS, z.d.). Het is niet bekend welke landgebruiksgegevens en bodemgegevens er als invoer zijn gebruikt, waardoor er geen uitspraak over de resolutie of het detailniveau van deze gegevens gedaan kan worden.

Het ET Tool algoritme maakt voor het bepalen van de actuele verdamping onder andere gebruik van Penman-Monteith formules. Aan de hand van de bovenstaande gegevens berekent het algoritme dagelijks, afzonderlijk voor de ondergrond en voor de beplanting, de verdamping (Bastiaanssen, 2012). Resultaat van deze berekeningen zijn dagelijkse gegevens over de actuele verdamping en het verdampingstekort in millimeters. De uitvoer bestaat uit NetCDF Rasterbestanden die dagelijks geleverd worden, gebruik maken van de 'WGS 84 / UTM zone 31N' projectie en een resolutie van 250m bij 250m hebben.

Het is opvallend dat voor het bepalen van de verdampingsgegevens relatief weinig satellietobservaties gebruikt worden. Zeker het ontbreken hiervan voor het bepalen van het bodemvocht heeft grote nadelen. Dit betekent dat veranderingen in waterbeschikbaarheid door wateraanvoer, peilveranderingen en onttrekkingen niet op een juiste manier in de verdampingsgegevens zichtbaar zijn. Een verandering in waterbeschikbaarheid kan wel leiden tot een grotere gewasdekking, en daarmee een hogere NDVI. Ook zou het albedo hierdoor beïnvloed kunnen worden, omdat de ondergrond een ander albedo heeft dan de plant zelf. Het hangt af van de rekenmethode die gebruikt wordt om de RS ET_{act} en ET_{def} te bepalen, in hoeverre dit een gevolg heeft voor de uitkomsten. Als de rekenmethode bijvoorbeeld eerst de potentiële verdamping berekend, en deze vervolgens gebruikt om samen met meteorologische variabelen de waterbeschikbaarheid te bepalen, zal het effect van een hoger NDVI invloed hebben op de omvang van de potentiële verdamping. Als de potentiële verdamping dan groter wordt, maar de hoeveelheid water die volgens de rekenmethode beschikbaar is, gelijk blijft, kan door een betere werkelijke

waterbeschikbaarheid en resulterende hogere gewasdekking, het verdampingstekort zelfs hoger worden. Ook het feit dat er gegevens met een lagere resolutie dan de uitvoer gebruikt worden, heeft impact op de kwaliteit.

Positionele nauwkeurigheid

Door de verdampingsgegevens bovenop luchtfoto's (ESRI, 2014) te plaatsen, is een ruwe schatting gemaakt van de positionele nauwkeurigheid van deze gegevens. Hierbij is gekeken naar de grens tussen land en water omdat deze goed waarneembaar is in de gegevens. In figuur 10 is duidelijk te zien dat de gegevens over het algemeen de grenzen goed volgen. Door de relatief lage resoluties ontstaan er echter afwijkingen. Hierdoor krijgen cellen die grotendeels uit water bestaan, toch een (lage) waarde die voor land geldt. Hetzelfde effect wordt ook waargenomen op andere plekken in het beheersgebied, zoals de IJssel bij Kampen (figuur 11). De grootste afwijking die in het gebied is waargenomen bedraagt 220m. De gemiddelde waargenomen afwijking is 120m (schatting). Deze afwijkingen hebben vooral bij gebruik voor kleine gebieden een groot effect. Het gevolg hiervan is dat de data alléén voor grotere gebieden toegepast kan worden, waardoor de fouten als gevolg van de positionele nauwkeurigheid tot een minimum beperkt worden.



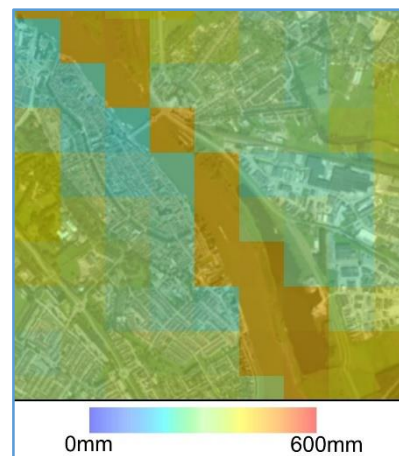
Figuur 10: De scheiding tussen water en land is duidelijk terug te zien in de RS verdampingsgegevens. Zie voor locatie bijlage 3. Luchtfoto: ESRI (2014b)

Logische samenhang

De logische samenhang van de verdampingsgegevens is goed. Alle gegevens die aangeleverd worden hebben dezelfde eenheden (mm/dag). Dit geldt zowel voor verschillende momenten in de tijd, als voor verschillende datasets, zoals de verdamping en het verdampingstekort. Hoewel in ArcGIS de eenheden niet weergegeven worden, zijn de bijbehorende eenheden wel verwerkt in de metadata van het NetCDF-bestand.

Compleetheid

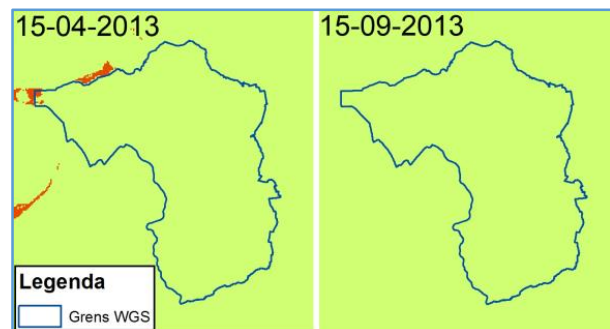
Over het algemeen zijn de gegevens compleet. Echter zijn er voor grote aaneengesloten wateroppervlakken geen gegevens beschikbaar. Op deze plekken zijn er zogenaamde 'NODATA' pixels waar te nemen, die geen waarde bevatten. De aanwezigheid van deze 'NODATA' pixels wordt minder naarmate het groeiseizoen vordert. De oorzaak hiervan is onbekend. In figuur 12 is een vergelijking gemaakt tussen gegevens van 15 april en 15 september 2013, waarin de 'NODATA' pixels in het rood aangegeven zijn. Vooral rond de meren ten westen van het gebied is aan het begin van het seizoen geen data beschikbaar. Later in het seizoen is dit wel het geval. Voor het waterschap levert dit echter weinig hinder op, omdat alle 'NODATA' pixels buiten de peilgebieden vallen. Ook de compleetheid in de tijd is goed. Over het algemeen worden de gegevens dagelijks aangeleverd. Gedurende de periode april tot en met september 2013 ontbreken (om onbekende reden) alleen de gegevens van 28 september.



Figuur 11: Afwijkingen zijn bij Kampen duidelijk te zien. Pixels met hoge verdampingswaarden hebben overlap met land. Zie voor locatie bijlage 3. Luchtfoto: ESRI (2014b)

Semantische nauwkeurigheid

De semantische nauwkeurigheid van de gegevens is goed. De definities die gebruikt worden om de gegevens aan te duiden, actuele verdamping en verdampingstekort, zijn duidelijk waardoor hier niet snel verwarring over ontstaat. Over de definitie van de actuele verdamping bestaat een consistent beeld in de literatuur (McMahon et al. , 2013 ; Rana et al. , 2000). Schuurmans et al. (2010) noemt dit ook wel de werkelijke verdamping. Ook het verdampingstekort heeft een consistente betekenis (DHV, 2012; Tallaksen et al. , 2004). Daarnaast is het gebruik van eenheden duidelijk. Hoewel deze eenheden niet worden geïmporteerd in ArcGIS, staat de eenheid 'millimeter' wel aangegeven in de metadata van de NetCDF-bestanden.



Figuur 12: In het begin van het seizoen worden 'NODATA' pixels (rood) waargenomen. Aan het eind van het seizoen komen deze niet meer voor.

Gebruik, doel en randvoorwaarden

Het doel van de data die eLeaf verstrekt, is toepassing voor de landbouw en het waterbeheer. Dit laatste doel is voor WGS van belang. De data kan gebruikt worden door waterschappen voor al hun werkprocessen en projecten en ook worden uitgeleend ten behoeve van onderzoekstrajecten waarin één of meerdere waterschappen zelf

participeren (J. Heijkers, persoonlijke mededeling, 1 mei 2014). Dit zorgt er wel voor dat de mogelijkheden van het gebruik van de gegevens voor externe communicatie, voornamelijk het delen van de gegevens, beperkt zijn.

Temporele kwaliteit

De verdampingsgegevens worden dagelijks geleverd. De tijdszone van de gegevens is gecoördineerde wereldtijd (UTC). Hoewel de verdampingsgegevens dagelijks worden geleverd, zijn niet alle gegevens die als invoer gebruikt worden, op dagelijkse basis beschikbaar. Zo worden van de MODIS beelden maar eens in de acht dagen gegevens aangeleverd en hierbij gaat het dan om composietbeelden over de laatste 16 dagen. Hoewel het NDVI en het albedo geleidelijke veranderingen vertonen, zal het feit dat de gegevens geëxtrapoleerd moeten worden wel effect hebben op de kwaliteit van de uitvoer.

Variatie in kwaliteit

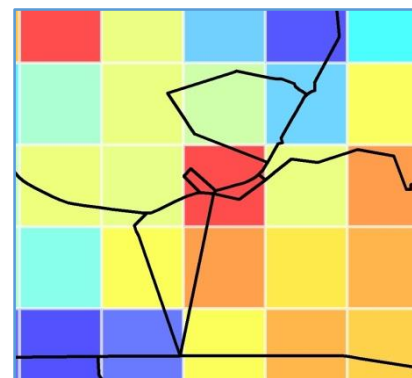
In de kwaliteit van de gegevens zit een variatie. Het ET Tool model levert niet voor ieder landgebruikstype even betrouwbare resultaten. Zo geven Caljé et al. (2014) aan dat de RS gegevens voor een bosgebied een hogere inschatting gaven dan de eddy-correlatie metingen, en voor een gebied met tarwe juist lagere waarden. Caljé et al. (2014) geven echter ook aan dat ze twijfels hebben over de nauwkeurigheid van de eddy-correlatie metingen. De variatie in kwaliteit voor de remotely sensed gegevens komt ook bij de resultaten van deelvraag 3 aan bod.

Meta-kwaliteit

De enige metadata die in de huidige situatie is ingesloten in de NetCDF-bestanden, zijn de eenheden, de aanmaakdatum en de gebruikte projectie. In een rapport van DHV (2012) wordt om uitgebreidere metadata gevraagd. Hierbij wordt onder andere gevraagd om een kwaliteitslabel per dag en inzicht in welke brongegevens (welke satelliet e.d.) er gebruikt worden voor het bepalen van de verdamping. Door het ontbreken van dergelijke gegevens is er geen inzicht in het verloop van de kwaliteit van dag tot dag.

Resolutie

De resolutie van de gegevens is 250 bij 250 meter. Als gevolg van de resolutie van de gegevens, kunnen de gegevens alleen toegepast worden op grotere gebieden. Enkele peilgebieden zijn bijvoorbeeld zo klein, dat ze slechts een klein deel van een pixel bestrijken (figuur 13). Van de peilgebieden die momenteel in HydroNET gebruikt worden, hebben 28 van de 853 een oppervlakte dat kleiner is dan 1 pixel van de data. Een groot deel van de gebieden (388/853) heeft een oppervlakte dat kleiner is dan 10 pixels. Door de gegevens te gebruiken voor kleinere gebieden, heeft een fout in één pixel groot effect op de resultaten voor het betreffende gebied.



Figuur 13: De resolutie van de gegevens is te laag om goede uitspraken te doen over kleine peilgebieden.

Samenvatting

Vooraf de herkomst van de data heeft invloed op de toepassingsmogelijkheden. Werkelijke bodemvochtmetingen worden niet gebruikt, en de RS albedo gegevens die gebruikt worden hebben een lagere resolutie dan de uitgevoerde verdampingsgegevens. Ook het feit dat voor het albedo en NDVI composietbeelden gebruikt worden beïnvloed de kwaliteit. De resolutie van de verdampingsgegevens zelf is ook laag. Hierdoor zijn de gegevens alléén toepasbaar op grotere gebieden. Een ander groot nadeel is dat er weinig metadata meegeleverd worden met de gegevens.

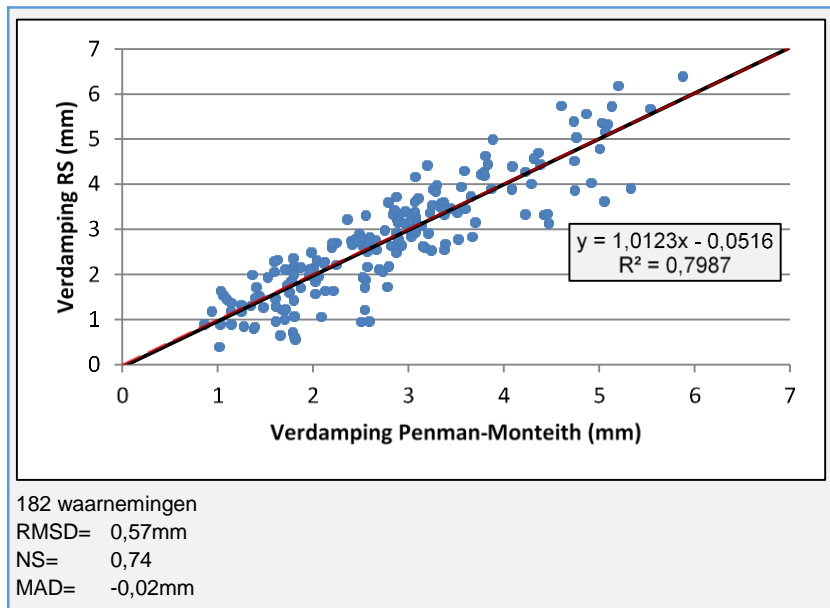
Tabel 5: Samenvatting resultaten van eerste deelvraag

Element	Beoordeling	Opmerkingen
Herkomst	-	Weinig satellietinvoer. Deze heeft ook nog eens lage (temporele) resolutie
Positionele nauwkeurigheid	-	Lage resolutie zorgt voor aanzienlijke afwijkingen
Logische samenhang	++	
Compleetheid	+	Aan het begin van het seizoen incompleet. Dit heeft echter geen consequenties voor waterschap. Wel ontbreekt 1 dag.
Semantische nauwkeurigheid	++	
Gebruik, doel, randvoorwaarden	-/+	Bruikbaarheid voor externe communicatie is een belangrijk nadeel.
Temporele kwaliteit	-/+	Satellietbeelden zijn composietbeelden. Meteorologische gegevens zijn wel dagelijks.
Variatie in kwaliteit	-	Er zit een afwijking in de kwaliteit van de gegevens per landgebruik.
Meta-kwaliteit	--	Alléén strikt noodzakelijke gegevens worden meegeleverd.
Resolutie	-	Door de resolutie kunnen de gegevens alleen voor grotere gebieden toegepast worden

4.2 Vraag 2: Nauwkeurigheid van RS ET_{pot} t.o.v. PM ET_{ref} voor puntmeting Heino

De vergelijking tussen de Penman-Monteith referentieverdamping (PM ET_{ref}) en de RS potentiële verdamping (RS ET_{pot}) ter hoogte van KNMI meetlocaties, laat zien dat er veel overeenkomsten zijn in de resultaten van de beide methoden.

De Penman-Monteith methode wordt in dit onderzoek als referentie gebruikt. Bij een vergelijking tussen de referentieverdamping aan de hand van deze methode en de potentiële verdamping op basis van remote sensing, is het duidelijk dat er een sterke correlatie bestaat tussen de gegevens (figuur 14). Dit toont aan dat de twee gegevensbronnen dezelfde trends vertonen. Echter is vooral de hoge waarde van de NS coëfficiënt belangrijk, omdat dit erop duidt dat er een grote mate van overeenkomst is tussen de gegevensbronnen en dat de absolute verschillen beperkt blijven. Uit de MAD blijkt tevens dat de gemiddelde absolute afwijking slechts -0,02mm per dag is. Er is dus geen sprake van een systematische afwijking, wat ook bevestigd wordt door het spreidingsdiagram. De gemiddelde waarde van de meetpixels voor de RS gegevens zijn gebruikt, zoals besproken in het hoofdstuk 3.



Figuur 14: Correlatie tussen de PM ET_{ref} en de RS ET_{pot} voor meetlocatie Heino

Om de invloed van het middelen van de waarden van de meetpixels te onderzoeken, is er ook kort een vergelijking gemaakt tussen de RS ET_{pot} waarden voor afzonderlijke meetpunten en de PM ET_{ref}. Hieruit blijkt dat de R² wanneer vergeleken wordt met afzonderlijke meetpunten bij Heino tussen de 0,69 en 0,83 ligt, de RMSE tussen de 0,51 en 0,81, de NS tussen de 0,48 en 0,78 en de MAD tussen de -0,20 en +0,16. Er zijn dus afwijkingen waar te nemen wanneer elke pixel afzonderlijk beschouwd wordt. Toch liggen de R², RMSD, NS en MAD van de vergelijking met het gemiddelde voor de RS meetpixels (figuur 14) dicht bij de beste waarden voor de afzonderlijke pixels.

Naast de R², RMSD, MAD en NS over het hele groeiseizoen, is er ook gekeken naar afzonderlijke maanden, om de afwijkingen tussen de methoden in de tijd zichtbaar te maken. Vooral aan het begin van het groeiseizoen, in de maand april, komen de grootste afwijkingen voor (figuur 15). Halverwege het groeiseizoen, in de maand juli zijn juist de meeste overeenkomsten tussen de gegevensbronnen waar te nemen. Dit is terug te zien in de R², RMSD en de NS die voor de betreffende maanden bepaald zijn (tabel 6). In de maand juli zijn de absolute verschillen klein. Zeker omdat de gemiddelde verdamping in de maand juli hoger is, is het feit dat de RMSD aanzienlijk lager is significant. Ook wordt uit de MAD duidelijk dat in de maand april de RS verdamping aanzienlijk lager uitvalt dan de Penman-Monteith referentieverdamping. In de maand juli is deze afwijking een stuk kleiner.

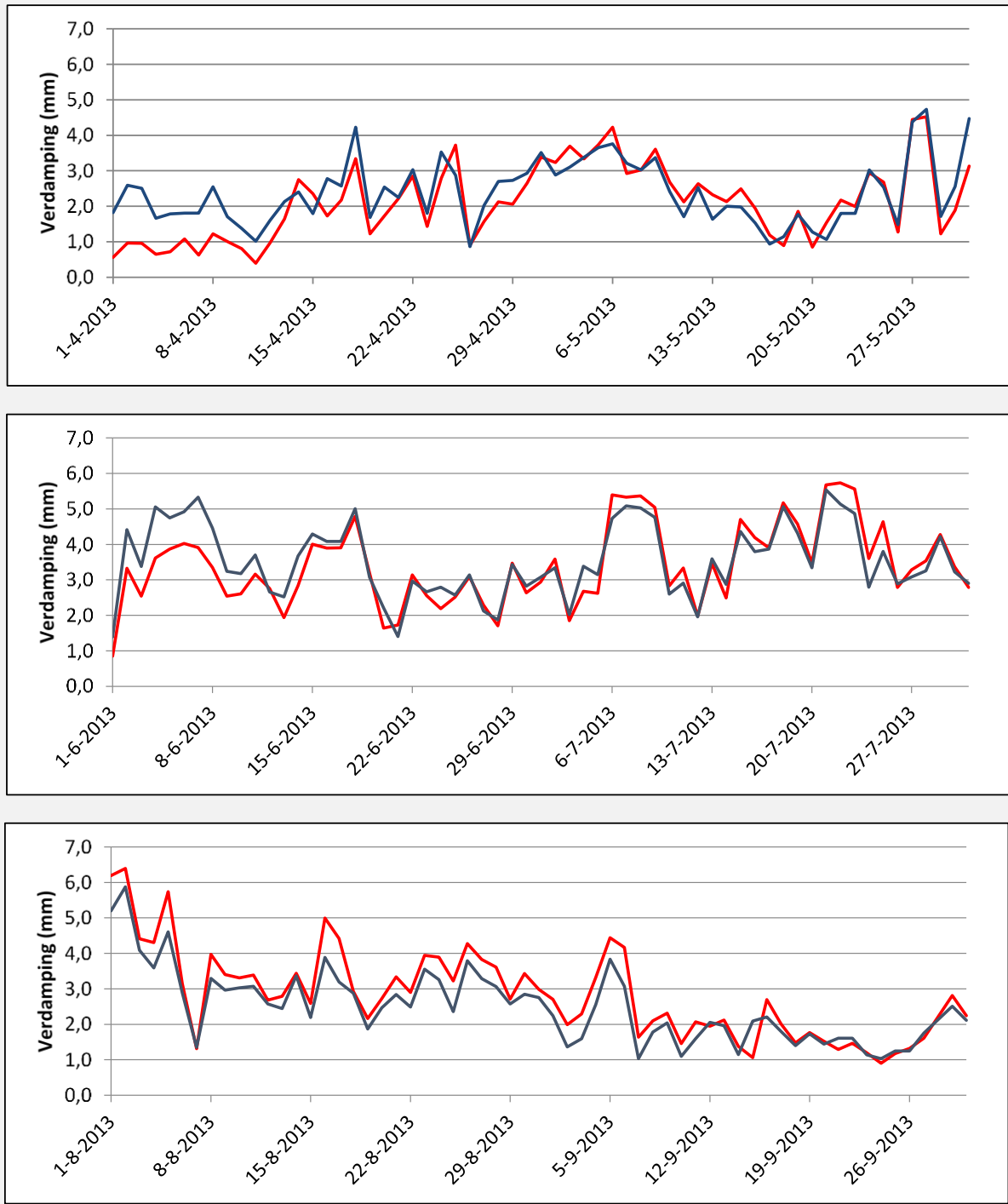
Hoewel de R² in april nog steeds sterk is, zijn de RMSD waarden relatief hoog en zijn de NS-waarden laag tot zeer laag. De lage waarden van de MAD duiden erop dat er sprake is van een systematische afwijking in april. Een mogelijke oorzaak van de grote afwijkingen in de eerste maand van het groeiseizoen, zou de koude periode in de eerste 10 dagen van deze maand, met een gemiddelde temperatuur van minder dan 4 °C kunnen zijn. Hooghart et al (1988) geven aan dat de Makkink en Penman-Monteith methoden in de winter geen betrouwbare resultaten geven. Ook tonen López-Urrea et al. (2006) aan dat de Penman-Monteith methode minder accurate waarden geeft wanneer de verdamping laag is. Het is daarom beter om de methoden Makkink en Penman-Monteith niet in koude perioden toe te passen. Als namelijk uitsluitend de eerste 10 dagen van april beschouwd worden, is te zien dat ook de R² hier zeer laag is. De grote afwijking in april treedt dus voornamelijk in de eerste 10 dagen van deze maand op.

Tabel 6: De overeenkomsten tussen de PM ET_{ref} en de RS ET_{pot} zijn het grootst in de maand juli. In de eerste 10 dagen van april treden grote afwijking op.

	April	April (Eerste 10 dagen)	Juli
Aantal waarnemingen:	30	10	31
R ² :	0,59	0,29	0,92
RMSD:	0,82mm	1,15mm	0,39mm
NS:	-0,34	-7,14	0,83
MAD:	-0,60mm	-1,10mm	0,17mm

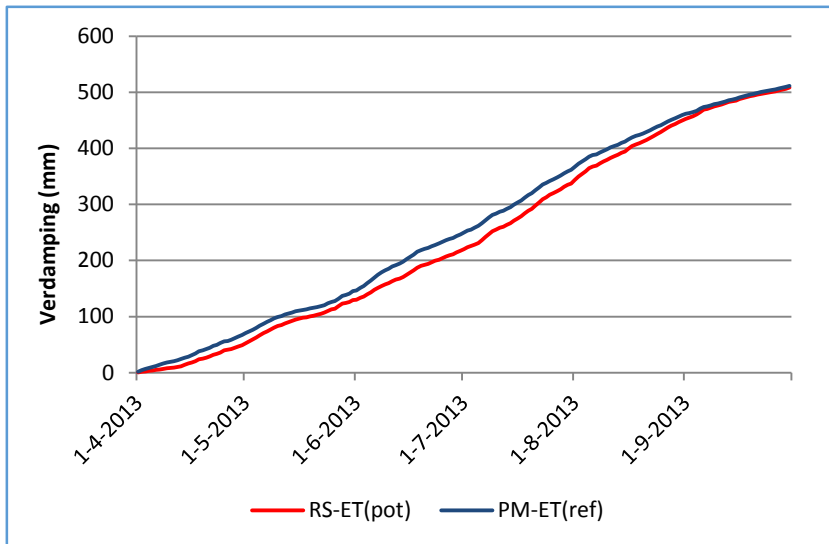
Dagelijkse verdamping april tot september 2013

Remote Sensing ET_{pot}
 Penman Monteith ET_{ref}



Figuur 15: Verloop van de PM ET_{ref} en de RS ET_{pot} over groeiseizoen 2013 voor meetlocatie Heino

Hoewel de verschillen tussen de cumulatieve referentieverdamping aan de hand van de Penman-Monteith methode en de cumulatieve potentiële verdamping aan de hand van remote sensing over het gehele groeiseizoen zeer beperkt zijn (3,1 mm), ontstaan er gedurende het groeiseizoen wel degelijk verschillen (figuur 16). Zo loopt de cumulatieve afwijking begin juli op tot 31mm.



Figuur 16: Cumulatieve PM ET_{ref} en RS ET_{pot} over groeiseizoen 2013 voor meetlocatie Heino.

De reden waarom dit verschil in de tweede helft van het groeiseizoen weer kleiner wordt, is omdat de remotely sensed gegevens in deze periode juist hogere waarden voor de verdamping geven ten opzichte van de Penman-Monteith methode.

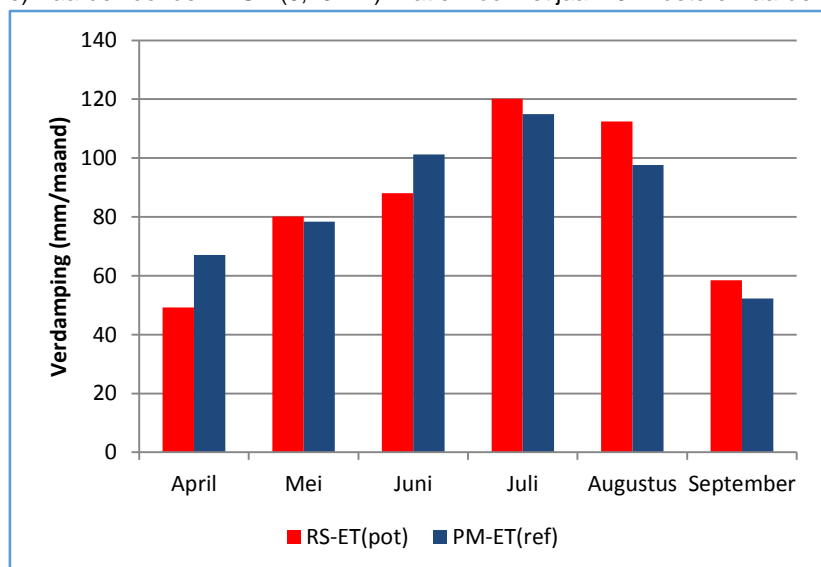
Dit is duidelijk te zien in figuur 15 en 17, waaruit valt af te leiden dat de Penman-Monteith methode vooral in de eerste 3 maanden een hogere verdamping berekend dan de gegevens op basis van RS. In de laatste maanden van het seizoen ligt de verdamping op basis van RS juist hoger. Zo is de berekende RS potentiële verdamping in de maand april 18mm lager dan de referentie verdamping op basis

van de Penman-Monteith methode. In de maand augustus liggen de resultaten op basis van remote sensing juist 15mm hoger dan de resultaten aan de hand van de Penman-Monteith methode.

Dit kan een gevolg zijn van de waarden voor het NDVI of het albedo, aangezien het model verder alléén gebruik maakt van meteorologische gegevens die dagelijks beschikbaar zijn en land/bodemgegevens. Zo worden NDVI waarden toegepast die in een voorgaande periode gemeten zijn, waardoor in het begin van het seizoen de vegetatiedekking wordt onderschat en deze aan het eind van het seizoen wordt overschat. Het is namelijk waarschijnlijk dat de NDVI, en dus ook de gewasdekking, in het voorjaar toenemen, en in het najaar afnemen. In het najaar kan dit effect versterkt worden door het feit dat de composietbeelden gemaakt worden door 'maximum value compositing' toe te passen (zie hoofdstuk 4.1). De hoge inschatting van de RS verdamping in het najaar kan dus het gevolg zijn van een overschatting van het NDVI.

Dezelfde vergelijkingen die gemaakt zijn voor de KNMI meetlocatie Heino zijn tevens gemaakt voor de meetlocatie Hoogeveen. Voor deze locatie werden dezelfde trends waargenomen en soortgelijke resultaten als voor de locatie Heino verkregen. Hier was de R^2 0,79; de RMSD 0,66; de NS 0,67 en de MAD -0,29. De gegevens voor de meetlocatie Hoogeveen bevestigen dus de resultaten die in Heino waargenomen worden. Ook is er gekeken naar de resultaten voor de meetlocatie Heino in 2012. Voor dit jaar werden hogere waarden voor de NS (0,85) en R^2 (0,92) gevonden en een lagere (betere) waarde voor de RMSD (0,43mm). Dat er voor het jaar 2012 betere waarden

gevonden worden, kan te maken hebben met het feit dat dit groeiseizoen geen extreem koude periode bevatte. Doordat zo'n periode, waar in 2013 grote afwijkingen bij optraden, niet aanwezig is, is het algemene resultaat voor 2012 beter. Ook in 2012 ligt de RS verdamping in de eerste maanden lager ten opzichte van de Penman-Monteith referentieverdamping dan in de laatste maanden van het seizoen. Deze waarneming wordt bevestigd door Caljé et al. (2014). Zij hebben een vergelijking gemaakt tussen de RS ET_{act} en eddy-correlatie metingen voor meerdere jaren voor verscheidene meetpunten binnen Nederland. Ook zij geven aan dat er in het begin van het seizoen sprake is van een onderschatting, en later in het seizoen van een overschatting. Ook komt uit dit onderzoek naar voren dat de RS verdampingsgegevens in vergelijking met eddy-correlatie beter presteerden dan hydrologische modellen zoals het Nationaal Hydrologisch Model (NHI).



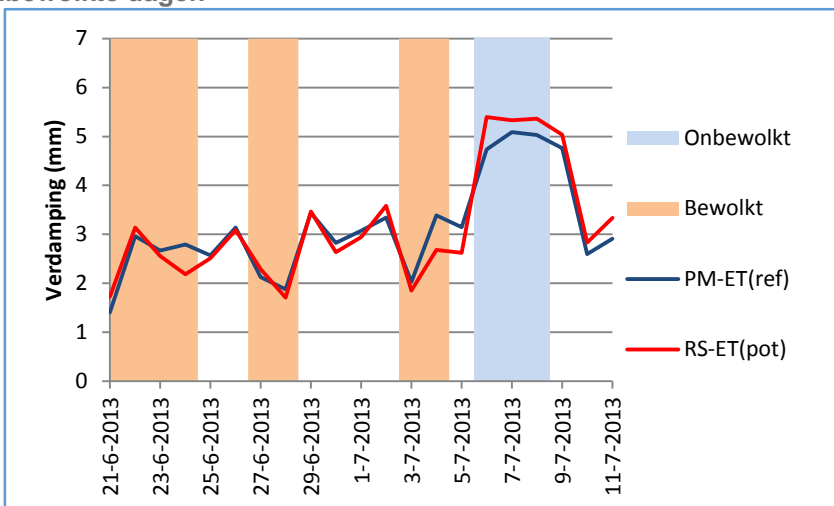
Figuur 17: Maandelijke cumulatieve PM ET_{ref} en RS ET_{pot} voor de meetlocatie Heino. In het voorjaar is de RS ET_{pot} lager dan de PM ET_{ref}, en in het najaar hoger.

4.2.1 Verschil bewolkte en onbewolkte dagen

Door gegevens over de gemiddelde bedekkingsgraad van de bewolking van 4 KNMI meetlocaties te gebruiken, zijn er 13 dagen aangemerkt als onbewolkt en 42 dagen als volledig bewolkt. Voor de meetlocatie Heino werden in de afwijkingen tussen Penman-Monteith referentie verdamping en de RS potentiële verdamping, tussen bewolkte en onbewolkte dagen geen grote verschillen waargenomen.

Zo worden wanneer gekeken wordt naar een doorlopende periode waarin zowel volledig bewolkte als onbewolkte dagen voorkomen, geen uitschieters in de afwijkingen waargenomen (figuur 18). Ook zijn er geen grote uitschieters ten opzichte van voorafgaande en opvolgende dagen te zien. Een T-toets toont dat er geen significant verschil is tussen de afwijkingen op bewolkte dagen en de afwijkingen op onbewolkte dagen.

Wel is de correlatie voor de onbewolkte situatie hoger dan de correlatie voor bewolkte dagen (figuur 19). De RMSD voor bewolkte dagen ligt lager dan die voor onbewolkte dagen. Dit komt voornamelijk door het feit dat de verdamping op bewolkte dagen over het algemeen lager is. De lage waarde van de NS-coëfficiënt bevestigt dit.

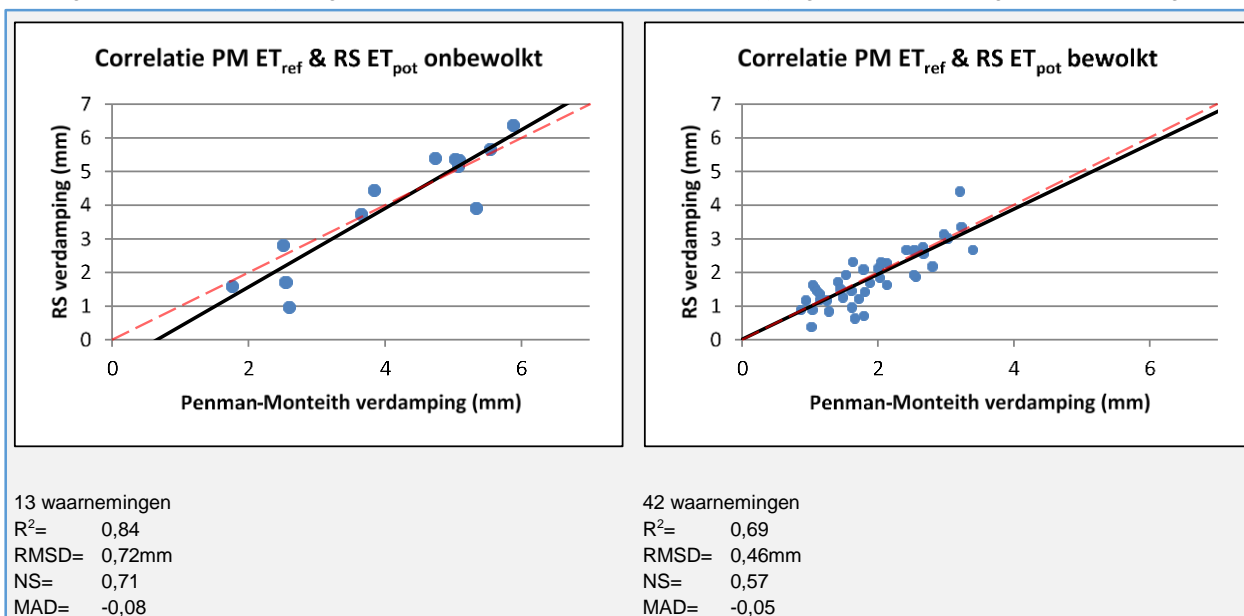


Figuur 18: Verloop van de PM ET_{ref} en RS ET_{pot} tussen 21 juni en 11 juli voor meetlocatie Heino. Uit een vergelijking van de bewolkte en onbewolkte dagen komen geen zichtbare verschillen naar voren.

Tabel 7: Een t-toets uitgevoerd op de afwijkingen tussen de PM ET_{ref} en RS ET_{pot} geeft geen significant verschil (kritieke waarde: 2,131)

	Onbew. dagen	Bew. dagen
n	13	42
Gem. Dev. $ET_{pot} - ET_{ref}$	-0,08	-0,05
Variantie	0,55	0,22
df	15	
t	-0,12	

De waarden voor de R^2 , de RMSD en de NS coëfficiënt toch laten zien dat er een verschil is, komt door het feit dat de T-toets alléén een vergelijking maakt van de gemiddelde afwijking. Hiervoor geldt dus dezelfde kanttekening als voor de MAD. Positieve en negatieve waarden worden gemiddeld, waardoor grote uitschieters uiteindelijk toch een waarde van rond de 0 kunnen geven. Deze grote uitschieters worden wel zichtbaar in de waarde van de R^2 , de RMSD en de NS. De resultaten voor de meetlocatie Heino worden bevestigd door de gegevens voor de meetlocatie Hoogeveen. Ook hier zijn er geen verschillen waar te nemen in de afwijkingen tussen voorafgaande en opvolgende



Figuur 19: Correlatie tussen de PM ET_{ref} en RS ET_{pot} op bewolkte en onbewolkte dagen voor meetlocatie Heino

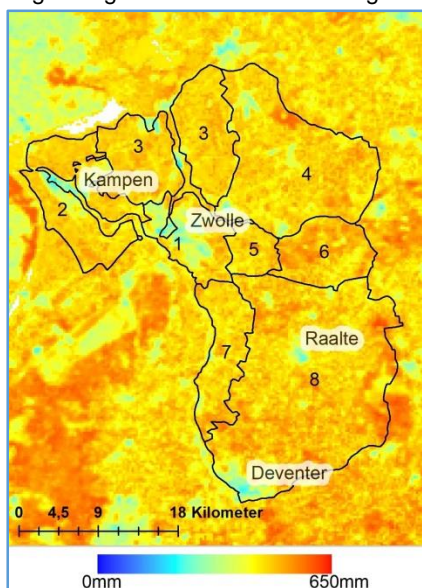
dagen, laat een t-toets geen significante verschillen zien en is de R^2 voor bewolkte dagen (0,72) lager dan de R^2 voor onbewolkte dagen (0,84).

De verschillen in figuur 19 kunnen gedeeltelijk verklaard worden door het feit dat er aanzienlijk minder onbewolkte dan bewolkte dagen zijn. Daarnaast geeft het feit dat er een verschil is, geen inzicht in de oorzaken van dit verschil. Zo wordt uit eerdere resultaten al duidelijk dat het verschil voor koudere dagen groter is, dan voor warmere dagen. Dat de verschillen afkomstig zijn van het feit dat er géén RS beelden beschikbaar waren, lijkt onwaarschijnlijk. Niet alléén is er geen verschil waar te nemen in de afwijkingen wanneer er naar een doorlopende periode gekeken wordt (figuur 18) maar ook maakt het ET Tool algoritme gebruik van 16-dagen composietbeelden, waardoor de impact van enkele bewolkte dagen beperkt blijft. Het is echter onbekend of de berekeningsmethode voor de RS gegevens uitkomsten van voorgaande dagen gebruikt in de berekeningen van opvolgende dagen.

4.3 Vraag 3: Vergelijking ruimtelijke spreiding RS en PM potentiële verdamping

De resultaten uit deze analyse tonen aan dat er ook overeenkomsten tussen de potentiële verdamping op basis van de Penman-Monteith methode en de RS potentiële verdamping zijn, wanneer er gekeken wordt naar deelgebieden (zie hoofdstuk 2). Toch zijn de absolute verschillen tussen de RS ET_{pot} en de PM ET_{ref} aanzienlijk. Uit tabel 8 kan afgeleid worden dat vooral de cumulatieve afwijking in het eerste deelgebied groot is. Ook in andere gebieden worden afwijkingen waargenomen. Met uitzondering van gebied 1 bedragen alle afwijkingen minder dan 10% van de cumulatieve PM ET_{pot} . Dat er afwijkingen zouden zijn, werd verwacht. Zo is uit bijlage 1 af te leiden dat er voor veel landgebruikstypen geen exacte match met een gewasfactor gevonden is.

Hierdoor zijn er aannamen gedaan over de toe te passen gewasfactor. Het grote verschil in gebied één is te verklaren door het feit dat er bij dit onderzoek voor bebouwd gebied gebruik gemaakt is van een gewasfactor voor verhard oppervlak bij de PM methode. Droogers (2009) geeft aan dat er ook rekening gehouden moet worden met de hoeveelheid groen en begroeiing tussen de bebouwing en de aard van het verhard oppervlak. Ook zegt hij dat de CBS bodemgebruiksgegevens (Zie hoofdstuk 2) van een te laag detailniveau zijn om op een goede manier de hoogte van de stedelijke verdamping te bepalen.



Figuur 20: Cumulatieve RS ET_{pot} voor groeiseizoen 2013. Vooral bossen (hoge verdamping) en steden (lage verdamping) zijn goed terug te zien.

Tabel 8: Afwijkingen tussen PM ET_{pot} en RS ET_{pot} . De laatste kolom laat de hoogte van de RS ET_{pot} ten opzichte van de PM ET_{pot} zien.

	Landgebruik /bodemtype	Penman-Monteith	Remote Sensing	Vershil RS-PM
Gebied 1	Bebouwd	371,91	426,95	55,04
Gebied 2	Gemengd	467,82	464,07	-3,75
Gebied 3	Veengebied	496,66	475,88	-20,77
Gebied 4	Zandgronden	487,09	470,66	-16,42
Gebied 5	Rivierklei	507,65	476,02	-31,63
Gebied 6	Bosgebied	530,36	494,24	-36,12
Gebied 7	Rivierklei	490,29	473,89	-16,40
Gebied 8	Zandgronden	489,60	482,13	-7,47

Tabel 9: Rangschikking van gebieden op de hoogte van de PM ET_{pot} en RS ET_{pot} . Alleen gebied 8 wijkt af in de rangorde.

	Penman-Monteith	Remote Sensing
Hoogste verdamping	Gebied 6	Gebied 6
	Gebied 5	Gebied 8
	Gebied 3	Gebied 5
	Gebied 7	Gebied 3
	Gebied 8	Gebied 7
	Gebied 4	Gebied 4
	Gebied 2	Gebied 2
	Gebied 1	Gebied 1
Laagste verdamping	Gebied 1	Gebied 1

Tabel 10: Prestatie indicatoren voor de RS ET_{pot} t.o.v. de PM ET_{pot} voor de deelgebieden.

Gebied	RMSD	MAD	R^2	NS
1	0,59	0,30	0,80	0,50
2	0,53	-0,02	0,78	0,75
3	0,58	-0,11	0,77	0,74
4	0,56	-0,09	0,80	0,76
5	0,59	-0,17	0,79	0,75
6	0,59	-0,20	0,82	0,76
7	0,55	-0,09	0,80	0,76
8	0,54	-0,04	0,82	0,77

Door de aanwezigheid van dergelijke afwijkingen is het waardevoller om te kijken naar de trends die de verschillende gegevensbronnen laten zien en te controleren of hier overeenkomsten in zitten. Door de gebieden voor elke methode te rangschikken op omvang van de verdamping, is af te leiden dat deze rangorde voor beide methoden zo goed als gelijk is. In alle gevallen is de verdamping voor gebied 1 het laagst. Hoewel de bebouwing een grote invloed heeft op de verdamping voor de methode Penman-Monteith, is ook in de gegevens op basis van de remote sensing duidelijk te zien dat het hier gaat om bebouwd gebied. Het enige gebied dat afwijkt in de rangorde, is gebied 8. De RS ET_{pot} wordt voor dit gebied relatief hoog ingeschat ten opzichte van de PM ET_{pot} . Hoewel dit gebied voor een gedeelte uit bos bestaat, waardoor hier een hogere verdamping te verwachten is, is dit ook al verwerkt in de gewasfactoren van de Penman-Monteith methode.

Naast de algemene trend zijn ook de R^2 , RMSD, NS en MAD waarden voor alle gebieden vergelijkbaar en hebben deze een goede waarde. Alleen voor gebied één wordt er een hogere RMSD en een lagere NS waargenomen. Dit is het gevolg van de hierboven besproken absolute verschillen tussen de methoden en het feit dat stedelijke verdamping niet goed bepaald kan worden aan de hand van de landgebruiksgegevens van het CBS. Dit heeft als gevolg dat de PM ET_{pot} hier geen betrouwbare resultaten geeft voor stedelijk gebied.

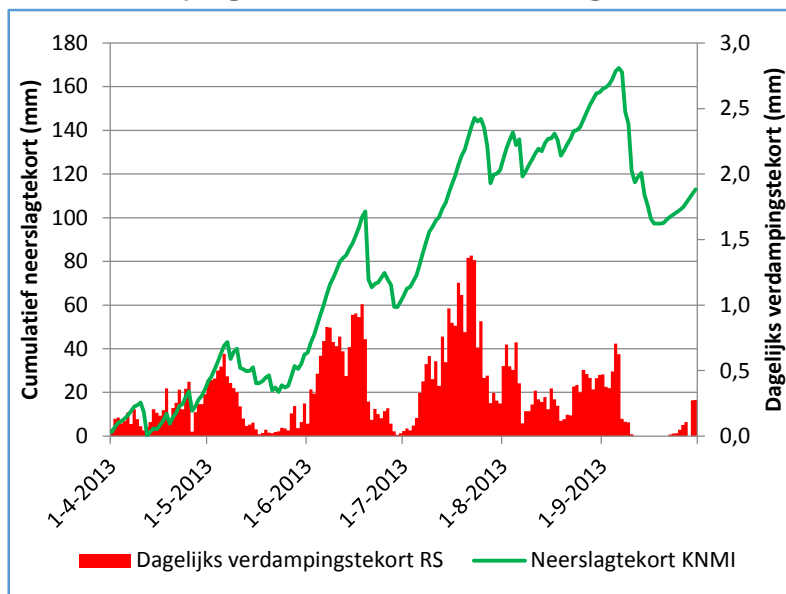
Ook bij een visuele inspectie van de verdampingsgegevens zijn de ruimtelijke verschillen duidelijk waar te nemen. Figuur 20 toont de cumulatieve RS ET_{pot} in de periode van 1 april 2013 tot en met 30 september 2013. Hierbij zijn bebouwde gebieden, die een lagere verdamping hebben dan de omgeving, duidelijk in de gegevens terug te zien. Ook is er voor de bossen in gebied 6 en het oosten van gebied 8 een duidelijk verschil in verdamping waar te nemen ten opzichte van de omgeving.

4.4 Vraag 4: Overeenkomsten RS verdampingstekort en KNMI neerslagtekort

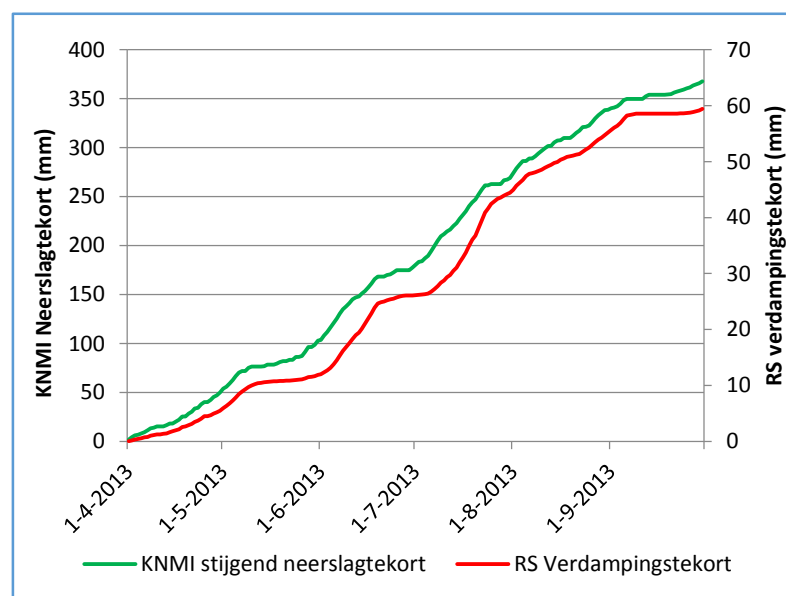
Tussen het RS verdampingstekort en het KNMI neerslagtekort, zijn goede overeenkomsten gevonden. Figuur 21 geeft een vergelijking van het cumulatieve KNMI neerslagtekort voor het meetstation Heino (op basis van de methode Makkink) en de dagwaarde van het verdampingstekort op basis van remote sensing weer. Zoals te zien is vallen de dagen waarop een hoog verdampingstekort optreedt, samen met de perioden waarin er een stijging van het neerslagtekort waarneembaar is. Op het eerste gezicht lijken de RS gegevens dus een goede inschatting te geven van de droogte in het gebied.

Hierbij moet echter wel gezegd worden dat het opvalt dat in perioden waar het volgens het KNMI het neerslagtekort nog steeds hoog zou zijn, zoals half september, de dagelijkse waarden voor het verdampingstekort nul worden. Dit heeft te maken met het feit dat het neerslagtekort een inschatting geeft van de droogte van de complete bodem, waar voor de vegetatie alléén de droogte in bovenste lagen van de bodem (De wortelzone) van belang is. Hoewel een langdurige regenbui het complete tekort uit de voorgaande niet maanden wegwerkt, zal dit wel voldoende water in de wortelzone van de vegetatie brengen. Er is dan nog steeds sprake van een neerslagtekort, maar de planten hebben genoeg water beschikbaar, waardoor het RS verdampingstekort wel nul kan worden. Aan de grote daling van het KNMI neerslagtekort in september is te zien dat hier over enkele dagen veel regen is gevallen, wat de lage waarden van het RS verdampingstekort in deze periode kan verklaren.

Hoewel er op het eerste gezicht veel overeenkomsten zijn (figuur 21 & 22), is de correlatie tussen het RS verdampingstekort en de dagelijkse verandering in het KNMI neerslagtekort toch beperkt. Er is een vergelijking gemaakt tussen de dagelijkse waarden van het RS verdampingstekort, en de dagelijkse verandering in het KNMI neerslagtekort. Negatieve dagelijkse



Figuur 21: Dagelijks RS verdampingstekort en cumulatief KNMI neerslagtekort (o.b.v. Makkink)

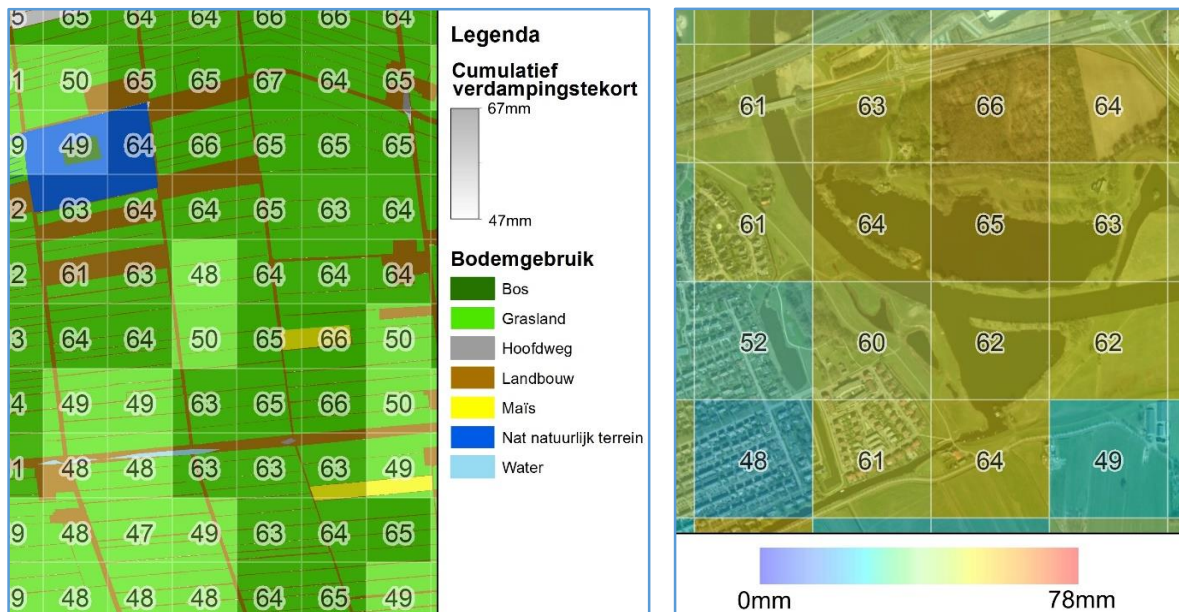


Figuur 22: Cumulatief RS verdampingstekort vergeleken met het cumulatieve KNMI neerslagtekort waarbij negatieve dagelijkse verandering zijn vervangen door 0

waarden voor het KNMI neerslagtekort zijn hierbij vervangen door nul, omdat het verdampingstekort ook niet negatief kan worden (zie hoofdstuk 3.4). Met een R^2 van 0,39 is er sprake van een matig verband tussen de gegevensbronnen.

In figuur 22 is het KNMI neerslagtekort, waarbij de negatieve dagelijkse veranderingen eruit gefilterd zijn, vergeleken met het cumulatieve RS verdampingstekort. Hier valt te zien dat, hoewel er een afwijking ontstaat in de eerste maand, de twee lijnen een soortgelijke trend vertonen. Dat de afwijking in de eerste maand groter is, is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat de methoden op basis van KNMI gegevens de verdamping in de eerste maand aanzienlijk hoger inschatten dan de methode op basis van remote sensing zoals in paragraaf 4.2 besproken is.

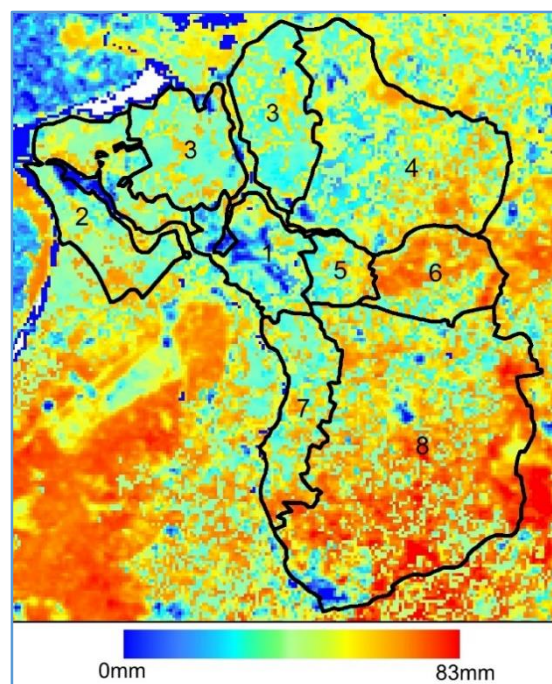
Dezelfde statistieken die hierboven beschouwd zijn, zijn ter verificatie tevens voor de KNMI meetlocatie Hoogeveen bekeken. Ook hier worden in de grafieken goede overeenkomsten waargenomen, en is de waarde voor de R^2 (0,33) vergelijkbaar met de waarde die voor Heino gevonden is.



Figuur 23: Links: Afwijkingen zijn zichtbaar in het RS verdampingstekort bij een gelijk landgebruik. Rechts: Een te hoge waarde voor het RS verdampingstekort wordt waargenomen voor water. Resolutie: 250m. Zie voor locaties van afbeeldingen bijlage 3.

Als uitsluitend naar het patroon van het RS verdampingstekort gekeken wordt, wordt duidelijk dat het ruimtelijke verloop van deze gegevens verre van vloeiend is. Pixels die naast elkaar liggen hebben soms een groot verschil in verdamping. Zelfs als er gekeken wordt naar plaatsen die een soortgelijk landgebruik hebben volgens de dataset die voor deelvraag 4 opgesteld is, zijn duidelijke verschillen tussen de pixels waarneembaar (figuur 23, links). De cumulatieve waarden over het groeiseizoen wijken hier bijna 20mm af, terwijl enkele pixels toch hetzelfde landgebruik lijken te hebben. Uit het totaalbeeld van het verdampingstekort (figuur 24) valt op te maken dat het hier niet gaat om een verloop in het verdampingstekort, en het dus echt om lokale verschillen gaat. Het effect hiervan is vooral groot wanneer de gegevens gebruikt worden om conclusies te trekken over kleine gebieden. Het is dus beter om alléén conclusies over grotere gebieden te trekken, die meerdere pixels bevatten.

Een andere belangrijke waarneming is dat het verdampingstekort voor gebieden met open water soms uitzonderlijk hoog is. Figuur 23 (rechts) toont een luchtfoto met daaroverheen het cumulatieve verdampingstekort van de periode april tot september 2013. Zoals te zien is, is er voor gebieden die voor een groot deel uit open water bestaan, door het model toch een hoog verdampingstekort



Figuur 24: Totaal cumulatief RS verdampingstekort over groeiseizoen 2013

wordt berekend. Als een pixel het hele jaar door vol met water staat, zou het verdampingstekort 0 moeten zijn, en voor pixels voor een groot deel uit water bestaat zou het tekort laag moeten blijven. Ter referentie: het verdampingstekort voor bosgebieden, waar over het algemeen een hoog verdampingstekort waargenomen wordt ligt rond de 70mm. Dat het verdampingstekort voor pixels met veel water oploopt tot boven de 60mm is niet correct.

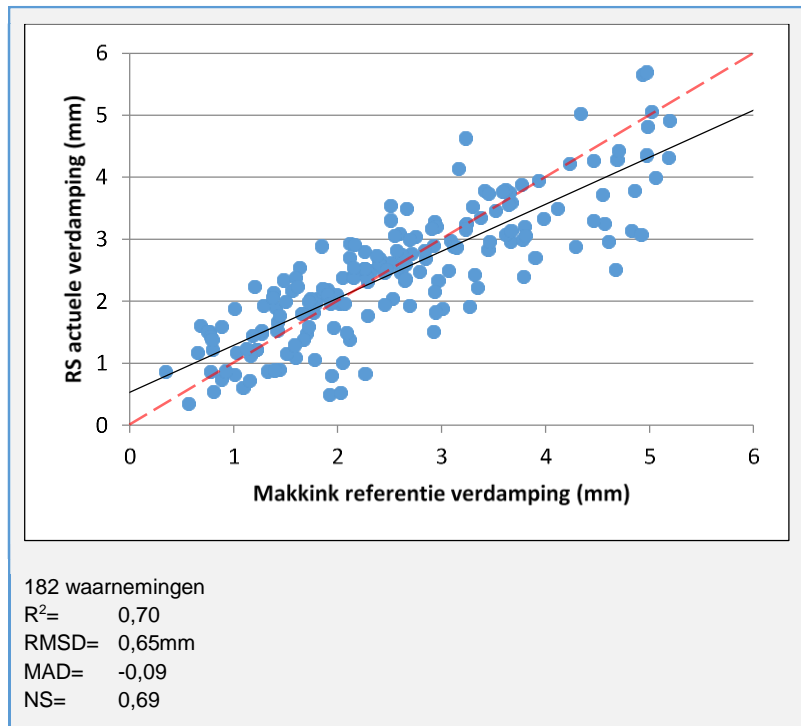
4.5 Vraag 5: Verschillen bij overstap van Makkink ET_{ref} naar RS ET_{act}

Zoals verwacht, treden er redelijke absolute verschillen op wanneer er een vergelijking gemaakt wordt tussen de actuele verdamping op basis van remote sensing (RS ET_{act}) en de referentieverdamping aan de hand van de methode Makkink (Mak ET_{ref}).

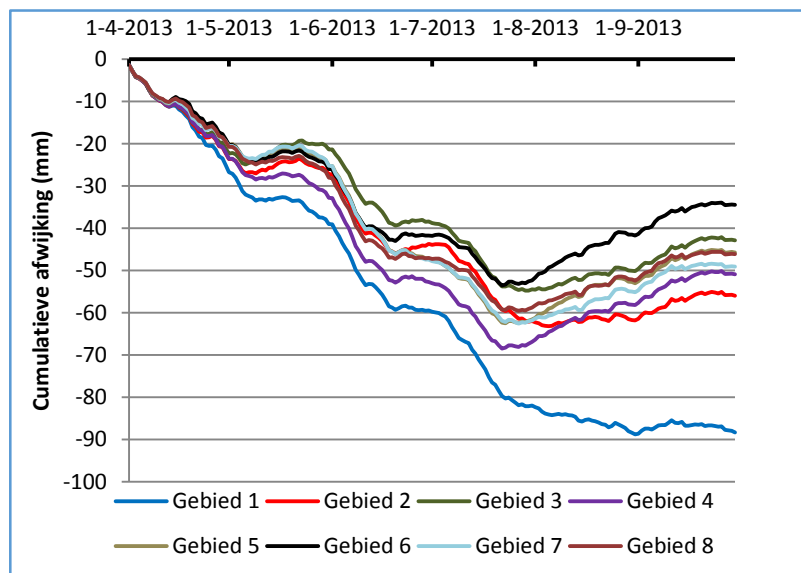
Er is allereerst gekeken naar de resultaten voor de meetlocatie Heino (puntmeting). Hierbij wordt duidelijk dat de cumulatieve RS ET_{act} aan het eind van het seizoen ongeveer 16mm lager uitviel dan de Makkink ET_{ref} . Gedurende het seizoen liep deze afwijking op tot -36mm. De RS ET_{act} valt dus lager uit. Dit is verwacht, aangezien de actuele verdamping te allen tijde lager moet zijn dan de referentieverdamping (potentiële verdamping voor gras, zie hoofdstuk 1.2). In dit opzicht is het opmerkelijk dat uit figuur 25 blijkt dat voor veel afzonderlijke dagen, de RS ET_{act} toch hoger is dan de Makkink ET_{ref} . Dit kan te maken hebben met het feit dat de RS gegevens in het najaar een overschatting geven van de verdamping, zoals besproken in hoofdstuk 4.2. Uit figuur 25 kan dus worden opgemaakt dat er geen sprake is van een systematische afwijking, waardoor de RS actuele verdamping lager uitvalt dan de Makkink referentie verdamping. In het najaar is de RS ET_{act} op veel dagen hoger dan de Makkink ET_{ref} .

Bovenstaande resultaten zijn behaald aan de hand van gegevens voor de meetlocatie Heino. Bij een vergelijking voor de KNMI meetlocatie Hoogeveen zijn soortgelijke resultaten waargenomen. Hier was de R^2 0,70; de RMSD 0,68; de NS 0,65 en de MAD -0,23.

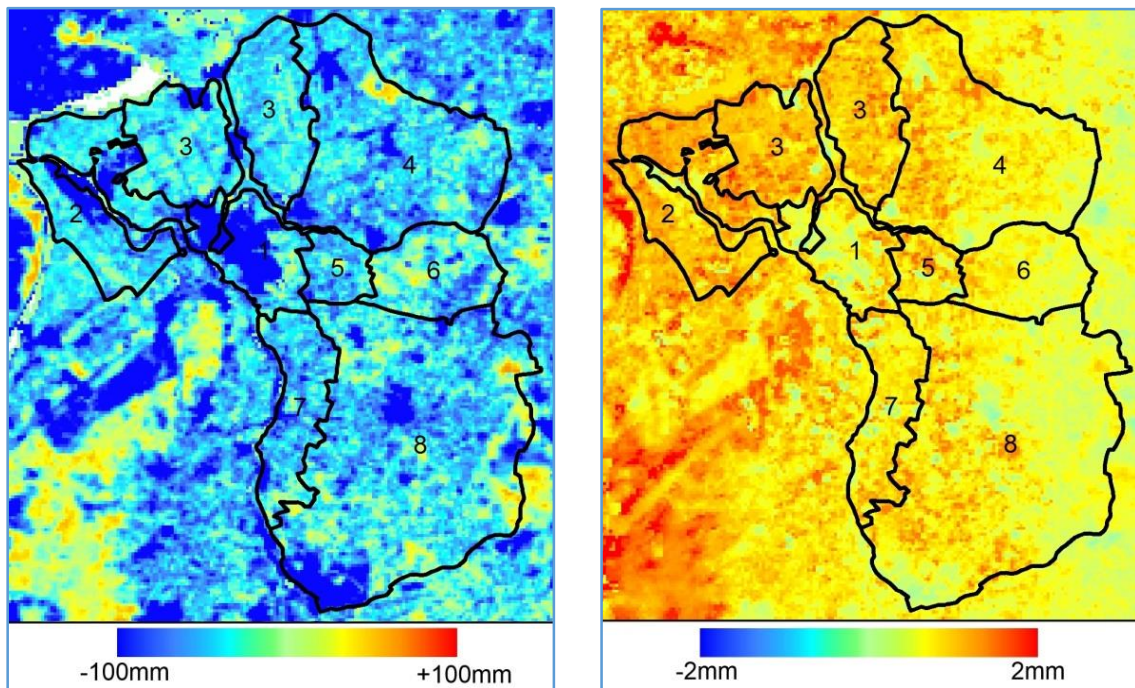
Voor deelgebied 1, dat voor een groot deel uit stedelijk gebied bestaat, ligt zoals verwacht de RS ET_{act} een stuk lager dan de Makkink ET_{ref} (-88mm) (zie figuur 26). Gebied 6 heeft zoals verwacht de hoogste RS ET_{act} en heeft daarom de kleinste afwijking met de methode Makkink (-35mm)



Figuur 25: Correlatie tussen de Makkink ET_{ref} en de RS ET_{act} voor de meetlocatie Heino



Figuur 26: Cumulatieve afwijkingen van de RS ET_{act} en opzichte van de Makkink ET_{ref} voor gebieden. Voor alle gebieden ligt de cumulatieve RS ET_{act} lager dan de Makkink ET_{ref}



Figuur 27: Links: Totale afwijking van RS ET_{act} t.o.v. Makkink ET_{ref}. Een minwaarde geeft aan dat de RS ET_{act} lager is dan de Makkink ET_{ref}. Rechts: Afwijkingen van RS ET_{act} t.o.v. Makkink ET_{ref} voor 11 september 2013

Naast de vergelijkingen per deelgebied is er een rasterbestand gemaakt die voor het hele gebied de cumulatieve verschillen aan het eind van het seizoen weergeeft (figuur 27, links). Hierin valt duidelijk te zien dat de RS actuele verdamping op zo goed als alle plaatsen in het gebied lager uitvalt dan de Makkink referentieverdamping. Vooral voor bebouwd gebied is de verdamping een stuk lager. Dit cumulatieve verschil loopt voor enkele pixels in en rond steden op tot ruim 200mm. Daarentegen is voor de bosgebieden in het oosten van gebied 8 en gebied 6 een hogere actuele verdamping waar te nemen. Ook voor het grasland in het gebied, dat het grootste oppervlak beslaat, wordt de actuele verdamping aanzienlijk lager ingeschat dan de referentieverdamping aan de hand van de methode Makkink. Als er gekeken wordt naar de verschillen van dag tot dag, valt niet voor iedere dag dezelfde trend waar te nemen. Zo is in figuur 27 (rechts) te zien dat op sommige dagen in het ene deel van het gebied de verdamping hoger is dan in het andere deel, en daarom de afwijkingen met de methode Makkink ook verschillen. In dit geval valt ook de RS actuele verdamping hoger uit dan de referentieverdamping op basis van de methode Makkink.

4.6 Vraag 6: Mogelijke toepassingen van remotely sensed gegevens

Mogelijke toepassingen van remotely sensed verdampingsgegevens zijn:

- Het bepalen van het juiste moment voor peilovergangen (Kaiser, 2012)
- Het sturen van de wateraanvoer (Verkerk et al. , 2011)
- Het inschatten van bergingsmogelijkheden (Van Ouwerkerk, 2012)
- Het uitvoeren van beleidsevaluaties (M. ter Haar, Persoonlijke mededeling, 18 juni 2014)
- Het risico op instabiliteit van dijken bepalen (Van Ouwerkerk, 2012)
- Het bepalen/toetsen van gewasschade (Van Ouwerkerk, 2012)
- Gebruik in hydrologische modellen of ter verificatie van deze modellen (Van Ouwerkerk, 2012)
- Communicatie met grondgebruikers

Elke toepassing stelt andere eisen aan de gegevens. Elk van de hierboven genoemde toepassingen wordt kort besproken.

Bepalen Peilovergangen

Om wateroverlast en droogte te voorkomen wordt er in veel gebieden in Nederland een afzonderlijk zomer- en winterpeil gehanteerd. Een hoger peil in de zomer moet ervoor zorgen dat de landbouw voldoende water beschikbaar heeft in deze periode, en droogte dus zo veel mogelijk voorkomen wordt. Het lagere winterpeil daarentegen zorgt ervoor dat wateroverlast tijdens de nattere winterperiode beperkt blijft. Doordat er minder water in de bodem aanwezig is, zal een grote regenbui minder overlast opleveren.

Voor het bepalen van het juiste moment voor deze peilovergangen is inzicht in droogte van belang. De remotely sensed gegevens hebben de potentie om voor grotere gebieden een indicatie te geven van de verdamping. Samen met het verdampingstekort kan er inschatting gemaakt worden van de droogte in het gebied. Wat hierbij echter wel ontbreekt, is de invloed van het huidige peil op de gewasgroei. Zoals besproken is hoofdstuk 4.1, is het

onwaarschijnlijk dat het effect van een betere waterbeschikbaarheid, zoals door een hoger peil, te zien is in de gegevens, omdat er voor het bepalen van het verdampingstekort gebruik gemaakt wordt van een methode die met meteorologische variabelen werkt. Alleen als deze veranderingen in waterbeschikbaarheid leiden tot een grotere gewasdekking, of een lager albedo, zal de potentiële verdamping hoger uit kunnen vallen. Doordat de potentiële verdamping als gevolg van een grotere gewasdekking hoger wordt, maar de waterbeschikbaarheid in het model gelijk blijft, zal het verdampingstekort echter hoger kunnen uitvallen, terwijl er juist sprake is van een betere waterbeschikbaarheid. Het is dus beter om beslissingen te nemen op basis van de gegeven potentiële verdamping in tegenstelling tot de actuele verdamping. De gegevens zijn in staat om een algemene indicatie van de verdamping voor grotere gebieden te geven en daarmee een beslissing over een peilovergang te ondersteunen. De effecten van deze overgangen zijn echter waarschijnlijk niet terug te zien in de gegevens. Ten opzichte van de huidige methode is vooral het feit dat de gegevens ruimtelijke verschillen in de verdamping weergeven een voordeel.

Sturen van wateraanvoer

Omdat de berekening van het verdampingstekort niet aan de hand van (satelliet)waarnemingen gebeurt, geven de gegevens geen inzicht in de werkelijke vochttoestand in het gebied. Dit betekent dat de effecten van het huidige watervereidingsbeleid niet in de gegevens terug komen. Precieze sturing is dus hoogstwaarschijnlijk niet mogelijk aan de hand van de remotely sensed gegevens. Een algemeen beeld van de droogte in het gebied kan wel verkregen worden uit de gegevens, waardoor er besloten kan worden om meer water in te laten. In de vorige paragraaf is al behandeld dat, afhankelijk van de rekenmethoden van eLeaf, het verdampingstekort zelfs hoger uit kan vallen wanneer er meer water beschikbaar is. Daarom zal vooral gekeken moeten worden naar de hoogte van de potentiële verdamping. Het voordeel ten opzichte van de huidige methode ligt in het feit dat de RS gegevens de ruimtelijke spreiding van de verdamping weergeven.

Inschatten van bergingsmogelijkheden

Het is belangrijk om goed zicht te hebben op de bergingsmogelijkheden in het gebied. Door een inzicht in droogte te hebben, kan bepaald worden hoe groot de bergingscapaciteit van de bodem is. De remotely sensed gegevens kunnen hieraan bijdragen. Door inzicht te hebben in de verdamping die opgetreden is, in relatie tot de gevallen neerslag, kan er een schatting gemaakt worden van de bergingsmogelijkheden die nog in het gebied aanwezig zijn. Dit kan echter niet voor kleine gebieden gebeuren, aangezien de gegevens alléén over grotere gebieden betrouwbare resultaten geven. Zoals eerder aangegeven moet er niet uitgegaan worden van de hoogte van het verdampingstekort, aangezien deze kan afwijken van de werkelijke situatie. Zolang hier geen onderzoek naar gedaan is, kan de potentiële verdamping gebruikt worden.

Uitvoeren van een beleidsevaluatie

Om het effect van maatregelen te bepalen is inzicht in droogte, natheid, en veranderingen hierin cruciaal. De huidige verdampingsgegevens gebruiken eigenlijk alléén meteorologische variabelen om de vochttoestand in het gebied te bepalen. Aanpassingen in het gebied hebben alléén invloed op de waarden voor de NDVI en het albedo. Wateraanvoer maatregelen kunnen effect hebben op de NDVI, omdat de hoeveelheid vegetatie groter kan worden. Zoals eerder gezegd kan, afhankelijk van de rekenmethode van eLeaf, het verdampingstekort onbetrouwbare waarden geven. Er zal dus gekeken moeten worden naar de potentiële verdamping. Het effect van een maatregel zal, als hij al duidelijk wordt uit de gegevens, zeker niet gelijk waar te nemen zijn, aangezien de temporele resolutie van de MODIS gegevens laag is. Een goede evaluatie van maatregelen kan dus niet plaatsvinden op basis van de remotely sensed gegevens.

Risico op instabiliteit dijken

De gegevens niet goed toepasbaar om het risico op instabiliteit van dijken in te schatten. Hiervoor is de huidige resolutie van 250m te laag. Veendijken zijn vaak het meest vatbaar voor instabiliteit als gevolg van droogte. Dit komt doordat in deze dijken scheuren kunnen ontstaan door droogte, waardoor deze uiteindelijk kunnen bezwijken. Voor het Waterschap Groot Salland is deze toepassing ook minder interessant, aangezien er geen veendijken in het beheersgebied van het waterschap liggen.

Het bepalen/toetsen gewasschade

Omdat lokale variaties in waterbeschikbaarheid, bijvoorbeeld door onttrekkingen, niet meegenomen zijn bij de bepaling van de waterbeschikbaarheid, kunnen de huidige gegevens geen bijdrage leveren aan het bepalen van ontstane gewasschade.

Gebruik in Hydrologische modellen

De gegevens zijn geschikt om te gebruiken in Hydrologische modellen. Per geval hangt het natuurlijk van de gewenste resolutie af of de gegevens werkelijk toe te passen zijn. Hoewel de gegevens geen indicatie geven van de werkelijke waterbeschikbaarheid in het gebied, komen ze toch dicht in de buurt van eddy-correlatie metingen en geven ze een goede schatting van de actuele verdamping vergeleken met andere veelgebruikte modellen (Caljé et al., 2014). Dit betekent dat de gegevens bij afwezigheid van nauwkeurigere eddy-correlatie of lysimeter metingen gebruikt kunnen worden als invoer voor modellen en eventueel ter verificatie van modellen.

Communicatie met grondgebruikers

“Beelden zeggen meer dan 1000 woorden”. Omdat beelden vaak effectieve communicatiemiddelen zijn, zou toepassing van verdampingsbeelden voor communicatiedoeleinden wenselijk zijn. Er zitten echter grenzen aan de

mogelijkheden hiervan. Uit hoofdstuk 4.1 blijkt dat de verdampingsbeelden bedoeld zijn om te gebruiken voor werkprocessen van de waterschappen of te gebruiken voor onderzoeksprojecten waar de waterschappen in participeren. Hoogstwaarschijnlijk laat de gebruikersovereenkomst communicatie met derden maar zeer beperkt toe. Dit betekent het voor communicatie waarschijnlijk alléén toegestaan is om de visuele representatie van de gegevens te communiceren en eventueel cumulatieve verdampingswaarden over grote gebieden te geven. Het delen van exacte gegevens over de verdamping, aan de hand van de remotely sensed beelden, is hoogstwaarschijnlijk niet toegestaan. Hiervoor zou echter de gebruikersovereenkomst die gesloten is met de leverancier bekeken moeten worden.

5. Discussie

In voorgaande onderzoeken is nooit uitgebreid gekeken naar de invoergegevens voor de RS verdampingsgegevens. Een gevolg hiervan, namelijk dat naar voren is gekomen dat de gegevens helemaal geen inzicht geven in de actuele bodemvochttoestand binnen het gebied, is belangrijk voor de gebruikers van de gegevens. Ook de gevonden beperkingen ten aanzien van de gebiedsgrootte waarvoor de gegevens toegepast kunnen worden, zijn belangrijk voor eindgebruikers. Vooral de resultaten ten aanzien van de herkomst, positionele nauwkeurigheid, het gebruik en de resolutie zijn toegepast om de mogelijke toepassingen te evalueren. In toekomstige onderzoeken is het beter om deze analyse als eerste stap uit te voeren.

Ook zijn de toepasbaarheid van de gegevens en de mogelijkheden voor externe communicatie beschouwd. Doordat het waterschap echter niet beschikte over de gebruikersovereenkomst die door het SAT-WATER samenwerkingsverband afgesloten is, konden de grenzen voor toepassing niet precies in kaart gebracht worden. Bij een toekomstig onderzoek naar een nieuwe datalevering, is een beter inzicht te verkrijgen in de toepasbaarheid, door deze overeenkomst wel mee te beschouwen in het onderzoek.

Een grotere waterbeschikbaarheid kan, afhankelijk van de rekenmethode achter de RS gegevens, leiden tot een groter RS verdampingstekort. Zo kan als gevolg van de verbeterde waterbeschikbaarheid de NDVI groter worden. Als tegelijkertijd echter in het model de waterbeschikbaarheid gelijk blijft (aangezien hierbij niet uitgegaan wordt van waarnemingen), en het verdampingstekort berekend wordt aan de hand van de potentiële verdamping en de waterbeschikbaarheid, zal het berekende verdampingstekort dus hoger worden. De invloed van berekening of wateraanvoer op de NDVI of het albedo zal zeker niet direct terugkomen in het model. Er worden composietbeelden over de laatste 16 dagen gebruikt voor de NDVI en het albedo. Effecten van berekening of wateraanvoer op deze factoren zullen dus enkele dagen later pas terugkomen in de RS gegevens. Als er in de toekomst verdampingsgegevens ingekocht worden, waarbij het bodemvocht gebaseerd is op meteorologische variabelen, is onderzoek naar het effect van berekening op de RS verdampingsgegevens wenselijk.

In hoeverre (satelliet)observaties wel een goed inzicht in de lokale bodemvochttoestand kunnen geven is niet onderzocht. De huidige generatie satellieten kan namelijk alleen met lage resoluties ($\geq 10\text{Km}$) het bodemvocht bepalen, wat voor lokale toepassingen niet afdoende is. Hoewel de Sentinel-1 missie van de ESA hier verandering in kan brengen en resoluties van 1Km mogelijk zou moeten maken, zullen deze gegevens maar één keer in de drie of zes dagen beschikbaar komen en duurt het nog jaren voordat deze gegevens voorhanden zijn (Wagner et al. , 2013).

De vergelijking met verdampingsgegevens op basis van de methoden Makkink en Penman-Monteith leverde waardevolle resultaten. Vooral het feit dat vergelijkbare resultaten zijn verkregen bij een ander onderzoek, bevestigt in feite de verkregen resultaten. Bij deze vergelijking kan echter niet gesproken worden van een echte validatie van de gegevens. Geen van de gebruikte methoden maakte namelijk gebruik van directe metingen.

In hoeverre objectieve metingen van de verdamping mogelijk zijn is ook maar zeer de vraag. Zo zouden meetmethoden als de eddy-correlatie methode, of schattingen aan de hand van verdampingsspannen nog steeds leiden tot aanzienlijke fouten. Vaak worden lysimeters als meest accurate en directe bepalingmethode gezien vergeleken met eddy-correlatie metingen (Ding et al. , 2010), en verdampingsspan metingen (Allen et al. , 1998). Omdat lysimeters echter duur zijn om te maken, en veel onderhoud vergen, blijft het gebruik van lysimeters vaak beperkt tot onderzoekssituaties (Allen et al. , 1998). Zeker omdat er nog geen lysimeters in het beheersgebied van WGS aanwezig zijn, wordt toepassing hiervan uitsluitend voor onderzoek niet aanbevolen. Ook zijn voor geen van de hierboven genoemde methoden meetgegevens beschikbaar voor het beheersgebied van WGS.

De toegevoegde waarde van de onderzochte RS verdampingsgegevens ligt voornamelijk in het feit dat de gegevens een goede ruimtelijke weergave van de verdamping geven. Vergeleken met de berekende Penman-Monteith potentiële verdamping gaf de RS potentiële verdamping een betere weergave van de verdamping voor stedelijk gebied. Zeker ten opzichte van de methode die nu gebruikt wordt, waarbij wordt aangenomen dat de verdamping in het hele gebied gelijk is ($\text{Makkink } ET_{ref}$) is de toegevoegde waarde groot. Hoewel de gegevens de actuele verdamping overbrengen, is de toegevoegde waarde van het feit dat waterbeschikbaarheid hierbij is meegenomen kleiner. Werkelijke veranderingen in het bodemvocht door wateraanvoer of wateronttrekkingen worden door de gegevens niet goed weergegeven. Toch blijkt uit onderzoek van Caljé et al. (2014) dat de RS gegevens minder afwijkingen vertonen met eddy-eddy correlatiemetingen, dan andere veelgebruikte hydrologische modellen.

6. Conclusies en aanbevelingen

Vraag 1: Wat is de kwaliteit van de RS verdampingsgegevens?

Voor de verdampingsgegevens is weinig satellietinvoer gebruikt. Vooral het feit dat de waterbeschikbaarheid afgeleid wordt uit meteorologische gegevens heeft invloed op de kwaliteit, aangezien effecten van wateronttrekkingen of wateraanvoer niet, of niet goed uit de gegevens naar voren komen. De resolutie van de gegevens is ook een belangrijk nadeel. Hierdoor kunnen de gegevens niet gebruikt worden om de verdamping voor kleine peilgebieden te bepalen. Ook wordt slechts zeer weinig metadata meegeleverd, en ontbreken gegevens over de kwaliteit van dag tot dag in de metadata. Door al deze punten ligt de kwaliteit van de RS verdampingsgegevens lager dan verwacht.

Vraag 2: Wat is de nauwkeurigheid van de RS potentiële verdamping ten opzichte van de Penman-Monteith referentieverdamping op de KNMI meetlocatie Heino?

Tussen de RS ET_{pot} en PM ET_{ref} zijn een hoge R^2 (0,80) en NS (0,74) gevonden, en lage (gunstige) waarden voor de RMSD (0,57mm) en MAD (-0,02mm). Er zijn echter verschillen in de tijd waargenomen. In het voorjaar is de RS ET_{pot} lager dan de PM ET_{ref} en in het najaar ligt deze juist hoger. Deze afwijkingen worden door een ander onderzoek bevestigd. Hoewel voor een koude periode grote afwijkingen waargenomen zijn, lijkt dit een gevolg van slechte prestaties van de Penman-Monteith methode op koude dagen. De nauwkeurigheid van de RS potentiële verdamping is over het algemeen goed.

Vraag 3: Hoe verhoudt de RS potentiële verdamping zich tot de Penman-Monteith potentiële verdamping als er gekeken wordt naar de ruimtelijke spreiding

Met uitzondering van een gebied met een groot bebouwd oppervlak, bleven de absolute cumulatieve afwijkingen tussen de RS ET_{pot} en PM ET_{pot} over het hele groeiseizoen kleiner dan 10% van de cumulatieve PM ET_{pot} , waarbij de RS ET_{pot} lager uitviel dan de PM ET_{pot} . Voor deze gebieden waren de R^2 (0,80 gem.) en de NS (0,76 gem.) hoog, en waren de RMSD (0,56 mm gem.) en de MAD (-0,10 mm gem.) laag. Voor een gebied met veel bebouwing waren de afwijkingen groter, waardoor hier een lage NS (0,50) waargenomen werd. Dit lijkt echter een gevolg van de gebruikte rekenmethode voor de PM ET_{pot} , en komt waarschijnlijk niet door een onjuiste representatie in de RS gegevens. Ook bij een ordening van de gebieden, met het gebied met de grootste verdamping bovenaan, zijn de verschillen tussen de methoden klein. Vergelijken met de gebruikte Penman-Monteith methode geven de RS gegevens een betere ruimtelijke weergave van de verdamping.

Vraag 4: Hoe verhoudt het RS verdampingstekort zich tot het KNMI neerslagtekort?

Het RS verdampingstekort toont veel overeenkomsten met het KNMI neerslagtekort. In perioden waarin het KNMI neerslagtekort stijgt, en dus weinig neerslag is gevallen, zijn hoge dagelijkse waarden voor het verdampingstekort waargenomen. In perioden met veel regen wordt het verdampingstekort laag. Dit werd verwacht, aangezien de bepaling van het bodemvocht, die gebruikt wordt als invoer voor de RS gegevens, op basis van meteorologische variabelen gebeurt. Onjuistheden zijn wel waargenomen bij het beschouwen van de waarden voor individuele pixels. Over het algemeen zijn er veel overeenkomsten gevonden tussen het RS verdampingstekort en het KNMI neerslagtekort. Doordat enkele pixels echter onjuiste waarden geven, kunnen de gegevens alléén toegepast worden op grotere gebieden, waarbij uitspraken gebaseerd worden op een gemiddelde van meerdere pixels.

Vraag 5: Hoe groot zijn de verschillen die optreden wanneer er van de Makkink referentieverdamping wordt overgestapt op de RS actuele verdamping?

Verschillen die optreden bij een overstap zijn aanzienlijk. Als er alleen wordt gekeken naar grasland ter hoogte van de KNMI meetlocatie Heino, is het verschil slechts 16mm over een groeiseizoen, waarbij de RS ET_{act} lager uitvalt dan de Makkink ET_{ref} . Als er echter wordt gekeken naar grotere gebieden valt op dat de RS ET_{act} vooral voor bebouwing lager uitvalt dan de Makkink ET_{ref} , waarbij het verschil over een groeiseizoen oploopt tot 88mm. Voor een bosgebied van de RS ET_{act} slechts 35mm lager uit dan de Makkink ET_{ref} . Voor gebieden met een gevarieerd landgebruik ligt de cumulatieve RS ET_{act} rond de 50mm lager dan de Makkink ET_{ref} .

Vraag 6: Wat zijn de mogelijke toepassingen van de RS verdampingsgegevens?

Vanwege de lage resolutie van het gegevens, en het feit dat er geen waarnemingen ten aanzien van het bodemvocht gebruikt worden als invoer voor de verdampingsgegevens vallen veel mogelijke toepassingen af. De RS gegevens geven een algemeen inzicht in de hoogte van de verdamping die optreedt. Hiermee zouden de gegevens gebruikt kunnen worden om het juiste moment voor peilovergangen te bepalen, de wateraanvoer te sturen, en een ruwe schatting van bergingsmogelijkheden te maken. Gezien een ander onderzoek laat zien dat de prestaties van RS mogelijk zelfs beter zijn dan bestaande hydrologische modellen, kunnen de RS gegevens ook toegepast worden in, of ter verificatie van modellen, wanneer lysimeter of eddy-correlatie gegevens ontbreken. Doordat gevolgen van wateraanvoer en onttrekkingen niet, of niet goed uit de verdampingsgegevens naar voren komen, is het niet mogelijk om het effect van deze peilveranderingen, of wateraanvoer terug te zien in de gegevens. Hierdoor kunnen de gegevens niet gebruikt worden voor beleidsevaluaties of het toetsen van gewasschade. Door de lage resolutie is ook het bepalen van de instabiliteit van veendijken niet mogelijk. Voor WGS is dit echter niet van belang. De gegevens kunnen gebruikt worden voor communicatie met grondgebruikers, maar de gebruikersovereenkomst laat het verspreiden van exacte waarden voor kleine gebieden waarschijnlijk niet toe.

Hoofdvraag: Hoe nauwkeurig zijn de remotely sensed (RS) verdampingsgegevens in verhouding tot de verdamping bepaald aan de hand van de methoden Makkink en Penman-Monteith en hoe goed weergegeven deze gegevens de ruimtelijke spreiding van de actuele verdamping?

Uit het onderzoek blijkt dat de RS gegevens redelijk nauwkeurig zijn. Dit wordt bevestigd door andere onderzoeken, waarbij de RS gegevens zelfs beter presteerden dan modellen zoals het NHI. Ook is gebleken dat de RS gegevens de ruimtelijke spreiding goed weergegeven, en deze bijvoorbeeld beter weergegeven dan de Penman-Monteith methode die gebruikt is in dit onderzoek. Een keerzijde is echter dat er geen werkelijke waarnemingen ten aanzien van het bodemvocht gebruikt zijn, waardoor het effect van wateraanvoer en onttrekkingen niet, of niet goed in de verdampingsgegevens terugkomt. Vooral het feit dat de RS gegevens een goede weergave van de ruimtelijke spreiding geven is een voordeel ten opzichte van de Makkink methode die in de huidige situatie toegepast wordt.

Aanbevelingen

Onderzoek

Bij toekomstige onderzoeken naar de nauwkeurigheid van RS verdampingsgegevens moet als eerste stap onderzoek gedaan worden naar de herkomst van deze gegevens. Dit vergt relatief weinig inspanning, maar geeft een goed beeld van wat er met de gegevens mogelijk moet zijn, en wat de grenzen voor toepassing zijn. Bij een bespreking van de kwaliteit van de gegevens is het ook nuttig om de gebruiksovereenkomst te beschouwen. De kwaliteit is namelijk afhankelijk van of de gegevens aan de eisen van de gebruiker voldoen. Randvoorwaarden uit de gebruikersovereenkomst bepalen mede of de gegevens toegepast kunnen worden voor het beoogde gebruik. Zowel de herkomst van de gegevens, als randvoorwaarden aan het gebruik kunnen onderzocht worden voordat er gegevens ingekocht worden. Hierdoor ontstaan geen verassingen na inkoop.

Daarnaast is een onderzoek naar het effect van wateraanvoer op de verdamping en het verdampingstekort van belang. Tot zover zijn alléén vergelijkingen gemaakt met andere methoden voor het bepalen van de verdamping. Omdat de toegevoegde waarde van remote sensing eigenlijk ook zou moeten bestaan uit een inzicht in de actuele verdamping en droogte, is een onderzoek naar het effect van werkelijke waterbeschikbaarheid op de verdampingsgegevens belangrijk. Dit kan gedaan worden door gebieden waarvan bekend is dat er beregengd wordt, te vergelijken met gebieden waar niet beregengd wordt.

Praktijk

De gegevens bieden belangrijke voordelen ten opzichte van bepalingen op basis van de Makkink en Penman-Monteith methoden. Daarnaast geeft een ander onderzoek aan dat de RS gegevens zelfs een betere inschatting kunnen geven van de verdamping, dan veelgebruikte modellen als het NHI. Omdat dit momenteel de beste beschikbare verdampingsgegevens zijn, wordt toepassing van de gegevens aanbevolen. Wanneer de huidige verdampingsgegevens gebruikt worden, moet echter het feit dat er geen werkelijke waarnemingen van de bodemvochttoestand gebruikt zijn voor de gegevens, meegewogen worden bij het trekken van conclusies. Conclusies ten aanzien van wateraanvoer en onttrekkingen zijn hierdoor niet mogelijk. Ook moeten de gegevens niet op kleine gebieden toegepast worden.

Indien er gezocht gaat worden naar een leverancier die wel de waargenomen vochttoestand in het gebied kan tonen, moet er eerst onderzoek plaatsvinden naar de haalbaarheid en nauwkeurigheid hiervan. De huidige generatie satellieten kan alléén met lage resoluties ($\geq 10\text{Km}$) de hoeveelheid bodemvocht kan bepalen. Hier zou in de toekomst echter nog verandering in kunnen komen.

Het zoeken naar leveranciers die gegevens met een hogere resolutie kunnen leveren zou wel voordelen opleveren. Hierdoor zouden de verdampingsgegevens ook gebruikt kunnen worden om uitspraken te doen over de verdamping voor kleinere peilgebieden. Hierbij geldt echter ook dat er eerst een onderzoek gestart moet worden naar de nauwkeurigheid van deze gegevens. Een hogere resolutie heeft immers weinig meerwaarde als de verdamping minder nauwkeurig bepaald wordt.

7. Referenties

- AGEL Adviseurs. (2011). *Watertoets "Koeveringsedijk (Landgoed de Rijt) te Sint-Oedenrode*. Oosterhout: AGEL adviseurs. Opgeroepen op 13 mei 2014 van http://vind.sint-michielsgestel.nl/Durp_SintOedenrode/plans_SintOedenrode/NL.IMRO.0846.BP2011BUI02LGDRIJT-/NL.IMRO.0846.BP2011BUI02LGDRIJT-va01/NL.IMRO.0846.BP2011BUI02LGDRIJT-va01_5.pdf
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration*. Opgeroepen op 22 april 2014 van [uidaho.edu: http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf](http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf)
- Bastiaanssen, W. G., Cheema, M. J., Immerzeel, W. W., Miltenburg, I. J., & Pelgrum, H. (2012). *Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model*. *Water Resources Research*(48). Opgehaald van http://www.researchgate.net/profile/WGM_Bastiaanssen/publication/256505942_Surface_energy_balance_and_actual_evapotranspiration_of_the_transboundary_Indus_Basin_estimated_from_satellite_measurements_and_the_ETLook_model/file/3deec528f9d4dc5021.pdf
- Caljé, R., Schaars, F., & Heijkers, J. (2014). *Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping*. Amersfoort: STOWA. Opgeroepen op 23 april 2014 van http://stowa.nl/upload/publicatie2014/STOWA%202014%2018_LR%20webversie%2011%20april.pdf
- CBS. (2011). Bestand Bodemgebruik 2008. Opgeroepen op 24 april 2014 van [nationalegeoregister.nl: http://nationalegeoregister.nl/geonetwork/srv/dut/search#|a0cf5106-75dd-47ea-88dc-53b3f4b92776](http://nationalegeoregister.nl/geonetwork/srv/dut/search#|a0cf5106-75dd-47ea-88dc-53b3f4b92776)
- De Melo, G. L., & Fernandes, A. L. (2012). *EVALUATION OF EMPIRICAL METHODS TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN UBERABA, STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL*. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 32(5), pp. 875-888. Opgehaald van <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v32n5/07.pdf>
- DHV. (2012). *Quickscan droogte 2011 meerwaarde van Remote Sensing*. Opgeroepen op 9 mei 2014 van [HYDROMEDAH.nl: http://hydromedah.nl/satwater/downloads/AaenMaas2011_DHV-Quickscan_Droogte_2011.pdf](http://hydromedah.nl/satwater/downloads/AaenMaas2011_DHV-Quickscan_Droogte_2011.pdf)
- Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., Tong, L., & Sun, Q. (2010). *Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China*. *Agricultural Water Management*(98), 87-95. Opgehaald van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377410002611>
- Droogers, P. (2009). *Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer*. Utrecht: STOWA. Opgeroepen op 18 april van http://www.stowa.nl/Upload/publicaties/Rapport%202009-11_LR.pdf
- ESRI. (2014a). *Topo Basiskaart* (in RD). Opgeroepen op 29 april 2014 van [ArcGIS.com: https://www.arcgis.com/home/item.html?id=7aea6fa913a94176a1074edb40690318](http://www.arcgis.com/home/item.html?id=7aea6fa913a94176a1074edb40690318)
- ESRI. (2014b). *World Imagery*. Opgeroepen op 29 april 2014 van [arcgis.com: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9](http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9)
- Feddes, R. A. (1987). *Evaporation and weather. CROP FACTORS IN RELATION TO MAKKINK REFERENCE-CROP EVAPOTRANSPIRATION*, (pp. 33-45). Den Haag. Opgeroepen op 24 april 2014 van ftp://ftp.wur.nl/simgro/doc/Literature/Evaporation_and_weather_1987.pdf
- Hooghart, J. C., & Lablans, W. N. (1988). *Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. De Bilt: KNMI. Opgeroepen op 4 Juni 2014 van <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR111.pdf>
- Huete, A., Justice, C., & Van Leeuwen, W. (1999, april 30). *MODIS VEGETATION INDEX (MOD 13) ALGORITHM THEORETICAL BASIS DOCUMENT*. Opgeroepen op 7 juli 2014 van [NASA.gov: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)
- Kaiser, V. (2012). *TOEPASSING RS-DATA OPERATIONEEL PEILBEHEER*. Opgeroepen op 18 Juni 2014 van [hydromedah.nl: http://hydromedah.nl/satwater/downloads/Presentatie_Toepassing_Peilbeheer_\(V_Kaiser\).pdf](http://hydromedah.nl/satwater/downloads/Presentatie_Toepassing_Peilbeheer_(V_Kaiser).pdf)
- KNMI. (2005). *Hoofdstuk 10. Verdamping*. Opgeroepen op 23 april 2014 van [KNMI.nl: http://www.knmi.nl/samenw/hawa/pdf/Handboek_H10.pdf](http://www.knmi.nl/samenw/hawa/pdf/Handboek_H10.pdf)
- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006). *Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate*. *Agricultural Water Management*(85), 15-26. Opgehaald van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377406000965#>

- McClave, J. T., Benson, P. G., Sincich, T., & Knypstra, S. (2011). *Statistiek Een Inleiding* (11 ed.). Amsterdam: Peason Education Benelux.
- McMahon, T. A., Peel, M. C., Lowe, L., Srikanthan, R., & McVicar, T. R. (2013). *Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis*. *Hydrology and Earth System Sciences*(17), 1331-1363.
- NASA. (z.d.). *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Opgeroepen op 11 juni 2014 van Nasa Earth Observatory: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php
- PDOK. (2013, 01 01). *BRP Gewaspercelen WFS (service)*. Opgeroepen op 24 april 2014 van Nationaal Georegister: <http://nationaalgeoregister.nl/geonetwork/srv/dut/search#|5e59ddcd-aa68-461d-ba40-297b67c608cb>
- PDOK. (2013, november 14). *Fysischgeografischeregio's WMS (Service)*. Opgeroepen op 24 april 2014 van Nationaal Georegister: <http://nationaalgeoregister.nl/geonetwork/srv/dut/search#|6fcb4eaf-5a0d-494c-804b-c7f830b48306>
- Pelgrum, H., Miltenburg, I. J., Cheema, M. J., Klaasse, A., & Bastiaanssen, W. G. (2010). *ETLook: a novel continental evapotranspiration algorithm*. *Remote Sensing and Hydrology 2010 (Proceedings of a symposium held at Jackson Hole, Wyoming, USA, September 2010)* (pp. 120-123). Jackson Hole: IAHS.
- Rana, G., & Katerji, N. (2000). *Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review*. *European Journal of agronomy*(13), 125-153.
- Schuurmans, J. M., & Droogers, P. (2010). *Penman-Monteith Referentieverdamping*. Amersfoort: STOWA. Opgeroepen op 23 april 2014 van <http://www.stowa.nl/Upload/publicaties/STOWA%202010%2037%20LR.pdf>
- Simons, G., & Voogt, M. (2012). *Refined assessment of soil moisture and water consumption on the irrigated Canterbury Plains*. *Christchurch: Environment Canterbury Regional Council*. Opgeroepen op 6 mei 2014 van <http://ecan.govt.nz/publications/Reports/r12-59-assessment-soil-moisture-canterbury-plains.pdf>
- Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. A. (2004). *Hydrological Drought*. Philadelphia: Elsevier.
- TU Delft. (2011, Februari). 6. *Verdamping*. Opgeroepen op 18 april 2014 van slideshare.net: <http://www.slideshare.net/DelftOpenEr/ct2310-reader-6verdamping>
- USGS. (z.d.). *USGS Global Visualization Viewer*. Opgeroepen op 18 april 2014 van USGS.gov: <http://glovis.usgs.gov/>
- van Oort, P. (2006). *Spatial data quality: from description to application*. Opgeroepen op 22 april 2014 wur.nl: <http://edepot.wur.nl/38987>
- Van Ouwerkerk, R. (2012). *Toepassing van satellietinfo bij Calamiteitenbestrijding*. Opgeroepen op 18 Juni 2014 van hydromedah.nl: http://hydromedah.nl/satwater/downloads/SAT-Water_15_maart_Toepassingen_bij_Calamiteiten.ppt
- Verkerk, M., & Van Ouwerkerk, R. (2011). *Toekomst van het Waterbeheer zweeft in de ruimte*. Opgeroepen op 16 juni 2014 van hydromedah.nl: http://hydromedah.nl/satwater/downloads/SAT-Water_Waternetwerkdag_17_nov_2011.pdf
- Wagner, W., Sabel, D., Doubkova, M., Bartsch, A., & Pathe, C. (2013). *The potential of Sentinel-1 for monitoring soil moisture with a high spatial resolution at global scale*. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International* (pp. 4030-4033). Melbourne: IEEE. Opgehaald van http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_187543.pdf
- Waterschap Groot Salland. (z.d.). *Beheersgebied*. Opgeroepen op 18 april 2014 van WGS.nl: <http://www.wgs.nl/groot-salland/structuur/beheersgebied/>

Bijlagen

1. Gewasfactoren

Voor het onderzoek is er gebruik gemaakt van gewasfactoren van Droogers (2009). Hierbij wordt per periode van 10 dagen een gewasfactor gegeven. De lege plaatsen in de tabel van Droogers (2009) zijn aangevuld met de gewasfactor voor bodemevaporatie (AGEL Adviseurs, 2011). Deze waarden zijn gearceerd in de onderstaande tabel.

Tabel 11: Toegepaste gewasfactoren

	April			Mei			Juni			Juli			Augustus			September		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Aardappelen	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,9	1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,7	0,4	0,4
Bol/knolgewassen	0,4	0,4	0,4	0,4	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
Bouwland	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Granen	0,7	0,8	0,9	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Gras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9
Loofbos	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Loofbos inc. heide	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Mais	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Open water	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Peulvruchten	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,2	1,2	1	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Pit/steenvruchten	1	1	1	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
Plantuien	0,5	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	1	1	1	1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Suikerbieten	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,8	1	1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Verhard oppervlak	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Zaaiui	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	1	1	1	0,9	0,7	0,4	0,4

Koppeling landgebruik

Aan de landgebruikstypes uit de gecombineerde landgebruiksdataset (Gewaspercelen en CBS bodemgebruik, zie hoofdstuk 2.2) zijn de gewasfactoren gekoppeld. De toegepaste gewasfactor per landgebruikscategorie is in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 12: Gebruikte gewasfactoren per landgebruikstype

Landgebruikstype	Toegepaste gewasfactor
Aardappelen, consumptie op klei/lössgrond	Aardappelen
Aardappelen, consumptie op zand/veengrond	Aardappelen
Aardappelen, poot op klei/lössgrond	Aardappelen
Aardappelen, poot op zand/veengrond	Aardappelen
Aardappelen, zetmeel	Aardappelen
Bebouwd	Verhard oppervlak
Bedrijfsterrein	Verhard oppervlak
Bieten, suiker-	Suikerbieten
Bieten, voeder- (inclusief aardperen)	Suikerbieten
Bloembollen en -knollen	Bol/knolgewassen
Bloemkwekerijgewassen (inclusief bloemzaden)	Bol/knolgewassen
Bonen, tuin- (groen te oogsten)	Peulvruchten
Boomkwekerijgewassen en vaste planten, open grond	Loofbos
Boomkwekerijgewassen en vaste planten, pot- en containerveld	Loofbos
Bos	Loofbos
Bos (set aside regeling)	Loofbos
Bos, blijvend, met herplantplicht	Loofbos
Bos, zonder herplantplicht	Loofbos
Braak met bos (SBL-regeling na 28 juni 1995)	Loofbos
Braak, natuur-	Gras
Droog natuurlijk terrein	Gras
Faunaranden, bouwland	Bouwland
Faunaranden, grasland	Gras
Fruit	Pit/steenvruchten
Gerst, winter-	Granen
Gerst, zomer-	Granen

Landgebruikstype	Toegepaste gewasfactor
Glastuinbouw	Verhard oppervlak
Granen, overig	Granen
Grasland, blijvend	Gras
Grasland, natuurlijk	Gras
Grasland, tijdelijk	Gras
Graszaad (inclusief klaverzaad)	Gras
Graszoden	Gras
Groenbemesters, niet-vlinderbloemige	Gras
Groenten open grond (inclusief groentezaden)	Peulvruchten
Haver	Granen
Heide	Loofbos inc heide
Hennep, vezel-	Gras
Hoofdweg	Verhard oppervlak
Koolzaad, winter (ook boterzaad)	Gras
Koolzaad, zomer (ook boterzaad)	Gras
Landbouw	Gras
Lupinen, niet bittere-	Gras
Luzerne	Gras
Mais, corncob mix	Mais
Mais, korrel-	Mais
Mais, snij-	Mais
Mais, suiker-	Mais
Mais, energie-	Mais
Miscanthus (olifantsgras)	Gras
Nat natuurlijk terrein	Open water
Notenbomen	Loofbos
Onbeteelde grond door een teeltverbod/ontheffing	Bodemevaporatie
Onbeteelde grond, tijdelijk	Bodemevaporatie
Overige akkerbouwgewassen	Gras
Overige natuurterreinen	Gras
Recreatie	Gras
Rogge (geen snijrogge)	Granen
Semi-bebouwd	Bodemevaporatie
Spoorweg	Verhard oppervlak
Tarwe, winter-	Granen
Tarwe, zomer-	Granen
Triticale	Granen
Uien, poot en plant (incl. sjalotten)	Plantuien
Uien, zaai-	Zaaiui
Vliegveld	Verhard oppervlak
Water	Open water
Zonnebloemen	Bol/knolgewassen

2. Vergelijkingen Penman-Monteith en Makkink

De benodigde vergelijkingen voor het berekenen van de referentieverdamping worden gegeven in deze bijlage.

Makkink

De enige meteorologische parameters die als input gebruikt worden voor de Makkink methode zijn de gemiddelde temperatuur (T_{gem}) over een dag (in tegenstelling tot berekend uit de minimum en maximum temperatuur zoals bij Penman-Monteith) en de globale straling (Q). Aan de hand van vergelijking M5 wordt de dagelijkse verdamping berekend. Als invoer hiervoor moeten eerst de formules M1 t/m M4 gebruikt worden.

$$ET_{ref} = \frac{1000 * 0,65 * \Delta}{(\Delta + \gamma) * \rho * \lambda} * Q$$

Waarin:

ET_{ref}	Referentieverdamping (mm)
Δ	Helling van de dampspanningscurve (hPa/°C) [Vgl. M3]
ρ	Soortelijke massa van water (1000 kg/m ³)
γ	Psychrometerconstante (hPa/°C) [Vgl. M4]
λ	Verdampingswarmte van water (J/kg) [Vgl. M5]

Vergelijking M1

$$\Delta = \frac{7,5 * 237,3}{(237,3 + T_{gem})^2} * \ln(10) * e_s$$

Waarin:

Δ	Helling van de dampspanningscurve (hPa/°C)
e_s	Verzadigingsdampspanning (hPa) [Vgl. M2]
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur (°C)

Vergelijking M3

$$e_s = 6,107 * 10^{7,5 \frac{T_{gem}}{237,3 + T_{gem}}}$$

Waarin:

e_s	Verzadigingsdampspanning (hPa)
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur (°C)

Vergelijking M2

$$\gamma = 0,646 + 0,0006 * T_{gem}$$

Waarin:

γ	Psychrometerconstante (hPa/°C)
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur (°C)

Vergelijking M4

$$\lambda = 1000 * (2501 - 2,38 * T_{gem})$$

Waarin:

λ	Verdampingswarmte van water (J/kg)
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur (°C)

Vergelijking M5

Penman-Monteith

De Penman-Monteith methode heeft de minimale en maximale temperatuur (T_{min} , T_{max}), de minimale en maximale luchtvochtigheid (RH_{min} , RH_{max}), de windsnelheid (u_z) en de globale straling ($R_s \approx Q$) nodig als invoer. Om de dagelijkse verdamping aan de hand van de Penman-Monteith methode te bepalen, zijn de vergelijkingen PM1 tot PM11 gebruikt, afkomstig van Allen et al. (1998). In tegenstelling tot de methode Makkink, die gebruikt maakt van de gemiddelde temperatuur bepaald door het KNMI, wordt de gemiddelde temperatuur voor de Penman-Monteith methode bepaald aan de hand van de minimale en maximale temperatuur.

$$ET_{ref} = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_{gem} + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34u_2)}$$

Waarin:

ET_{ref}	Referentieverdamping (mm)
Δ	Helling van de dampspanningscurve (kPa/°C) [Vgl. PM4]
R_n	Netto straling (MJ/m ² /dag) [Vgl. PM11]
G	Bodem warmteflux ($G_{dag} \approx 0$) (MJ/m ² /dag)
γ	Psychrometerconstante (kPa/°C) [Vgl. PM6]
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur [Vgl. PM3] (°C)
u_2	Windsnelheid op 2 meter hoogte (m/s) [Vgl. PM5]
e_s	Verzadigingsdampspanning (kPa) [Vgl. PM2]
e_a	Actuele dampspanning (kPa) [Vgl. PM3]

Vergelijking PM1 (Allen et. Al. ,1998)

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}$$

Met e^0 :

$$e_0 = 0,6108 * e^{\frac{17,27 * T}{T + 237,3}}$$

Waarin:

e_s	Verzadigingsdampspanning (kPa)
e_0	Verzadigingsdampspanning voor T (kPa)
T_{max}	Maximale temperatuur (°C)
T_{min}	Minimale temperatuur (°C)

Vergelijking(en) PM2 (Allen et. Al. ,1998)

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) * \frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max}) * \frac{RH_{min}}{100}}{2}$$

Waarin:

e_0	Verzadigingsdampspanning voor T (kPa) [Vgl. PM2]
RH_{min}	Minimale relatieve luchtvochtigheid (%)
RH_{max}	Maximale relatieve luchtvochtigheid (%)
T_{min}	Minimale temperatuur (°C)
T_{max}	Maximale temperatuur (°C)

Vergelijking PM3 (Allen et. Al. ,1998)

$$u_2 = u_z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * z_{mv} - 5,42)}$$

Waarin:

u_z	Windsnelheid op hoogte z boven maaiveld (m/s)
z_{mv}	Hoogte windsnelheidsmeting boven maaiveld (m/s)
u_2	Windsnelheid op 2 meter boven maaiveld (m/s)

Vergelijking PM5 (Allen et. Al. ,1998)

$$\Delta = \frac{4098 * \left(0,6108 * e^{\frac{17,27 * T_{gem}}{T + 237,3}} \right)}{(T_{gem} + 237,3)^2}$$

Met T_{gem} :

$$T_{gem} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Waarin:

Δ	Helling van de dampspanningscurve (kPa/°C)
T_{gem}	Gemiddelde temperatuur (°C)
T_{min}	Minimale temperatuur (°C)
T_{max}	Maximale temperatuur (°C)

Vergelijking(en) PM4 (Allen et. Al. ,1998)

$$\gamma = \frac{1,013 * 10^{-3} * P}{0,622 * 2,45} = 0,665 * 10^{-3} * P$$

Met P:

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065 Z_{NAP}}{293} \right)^{5,26}$$

Waarin:

γ Psychrometerconstante (kPa/°C)
P Luchtdruk (kPa)
 Z_{NAP} Hoogte boven de zeespiegel (m)

Vergelijking(en) PM6 (Allen et. Al. ,1998)

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * 0,0820 * d_r * (\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s))$$

Met d_r :

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

Met ω_s :

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) * \tan(\delta))$$

Met δ :

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right)$$

Waarin:

R_a Buitenaardse straling (MJ/m²/dag)
 d_r Inverse van het kwadraat van de relatieve aarde-zon afstand (-)
 ω_s Hoek van de zon(radialen)
 ϕ Breedtegraad (radialen)
 δ Declinatie van de zon (radialen)
J Dag van het jaar (1-01=1 & 31-12=365)

Vergelijking(en) PM7 (Allen et. Al. ,1998)

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s$$

Waarin:

R_{ns} Netto kortgolvlige straling (MJ/m²/dag)
 α Albedo: 0,23 voor het referentiegewas (-)
 R_s Kortgolvlige straling (Globale straling gemeten door het KNMI) (MJ/m²/dag)

Vergelijking PM8 (Allen et. Al. ,1998)

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * Z_{NAP}) * R_a$$

Waarin:

R_{so} Onbewolkte zonnestraling (MJ/m²/dag)
 Z_{NAP} Hoogte boven de zeespiegel (m)
 R_a Buitenaardse straling [Vgl. PM7] (MJ/m²/dag)

Vergelijking PM9 (Allen et. Al. ,1998)

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Waarin:

R_{nl}	Netto uitgaande langgolvlige straling (MJ/m ² /dag)
σ	Constante van Stefan-Boltzmann (4,903*10 ⁻⁹ MJ/K ⁴ /m ² /dag)
T_{max}	Maximale temperatuur (°C)
T_{min}	Minimale temperatuur (°C)
e_a	Actuele dampspanning (kPa) [Vgl. PM3]
R_s	Kortgolvlige straling (Globale straling gemeten door het KNMI) (MJ/m ² /dag)
R_{so}	Onbewolkte zonnestraling (MJ/m ² /dag) [Vgl. PM9]

Vergelijking PM10 (Allen et. Al. ,1998)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

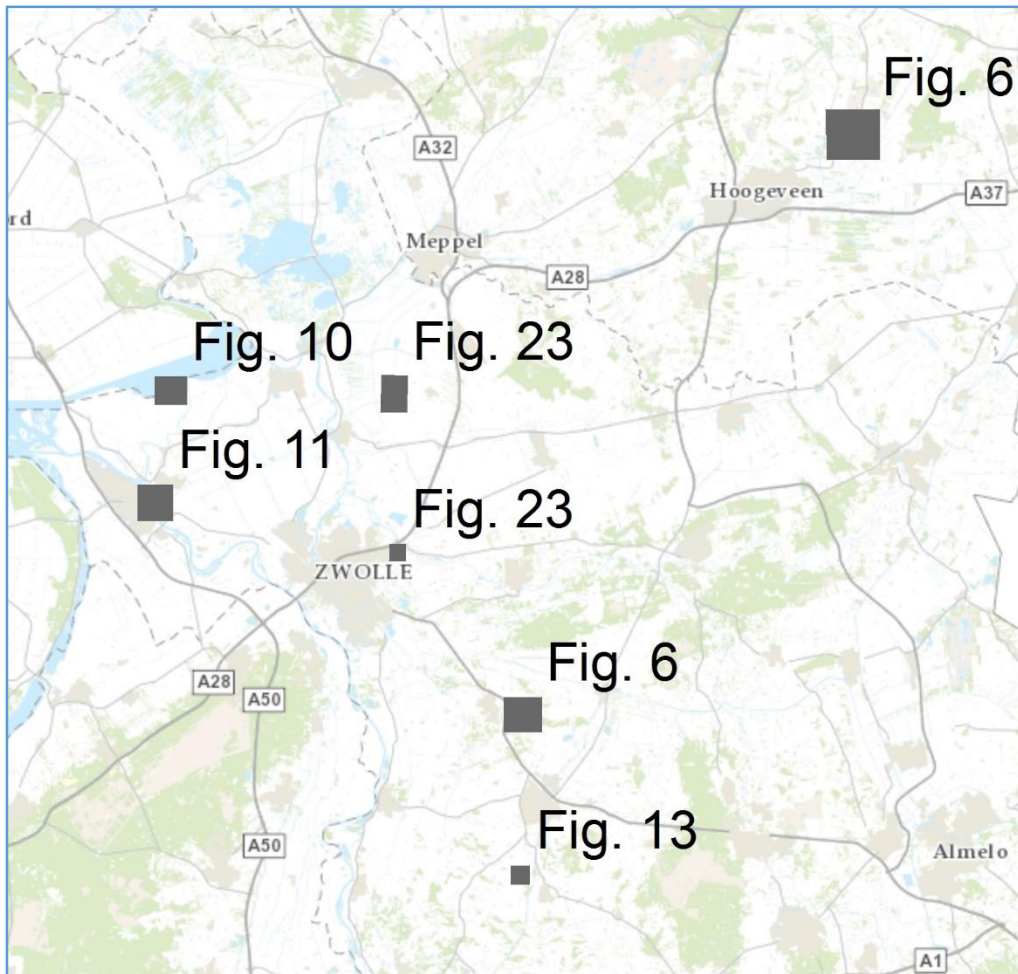
Waarin:

R_n	Netto straling (MJ/m ² /dag)
R_{ns}	Netto kortgolvlige straling (MJ/m ² /dag) [Vgl. PM8]
R_{nl}	Netto uitgaande langgolvlige straling (MJ/m ² /dag) [Vgl. PM10]

Vergelijking PM11 (Allen et. Al. ,1998)

3. Locaties kaarten

Van enkele kaarten in het verslag is de exacte locatie niet duidelijk. Deze plaatsen zijn met de bijbehorende figurnummers uit het verslag weergegeven in de onderstaande afbeelding.



Figuur 28: Locaties (extents) van kaartjes in het verslag, gelabeld met figuurnummer. Achtergrond: ESRI (2014a)