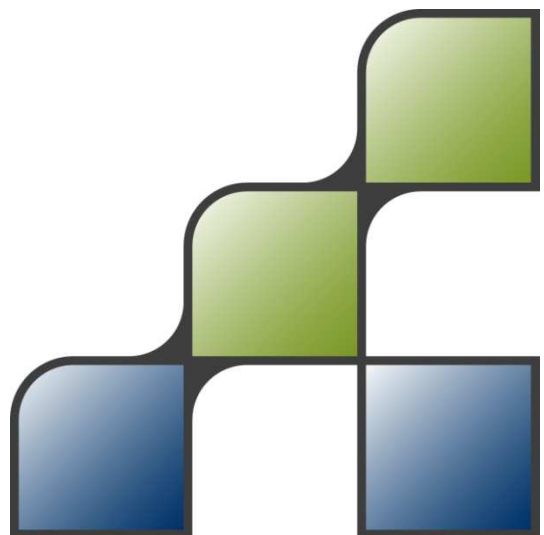


Penman-Monteith referentieverdamping:
Inventarisatie beschikbaarheid en
mogelijkheden tot regionalisatie



Penman-Monteith referentieverdamping: inventarisatie beschikbaarheid en mogelijkheden tot regionalisatie

September 2009

Auteurs

J.M. Schuurmans

P. Droogers

Opdrachtgever

STOWA

Begeleidingscommissie

J. den Besten

G. van den Eertwegh

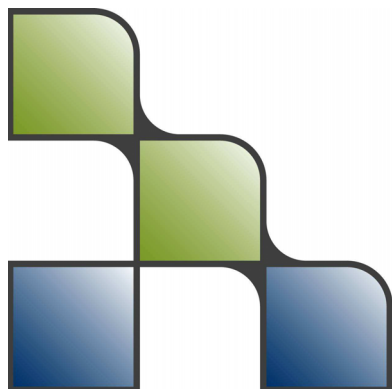
H. van Hardeveld

J. Heijkers

H. Niewold

M. Talsma

Report FutureWater: 86



FutureWater

Costerweg 1G
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Ten Geleide

In maart 2009 heeft de STOWA een studie afgerond met als doelstelling: “Verbetering van de schatting van de actuele verdamping van water, bodem en diverse vormen van landgebruik in ruimte en tijd voor toepassingen in het regionale waterbeheer.” Deze studie werd uitgevoerd door FutureWater en werd begeleid door een commissie bestaande uit afgevaardigden van STOWA en een viertal waterschappen (Droogers, 2009).

Deze studie heeft geleid tot een eindrapportage onder de titel “Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer: definitiestudie”. In deze rapportage (Droogers, 2009) staan een tiental concrete aanbevelingen voor de korte en de lange termijn, die kunnen worden samengevat tot de vier volgende punten:

1. Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten
2. Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren
3. Referentieverdamping verbeteren
4. Operationeel meten actuele verdamping

STOWA heeft FutureWater de opdracht gegeven om bovengenoemd punt 3 verder uit te werken door een inventarisatie uit te voeren naar de mogelijkheden om Penman-Monteith referentieverdamping te regionaliseren om zodoende tot een betere bepaling van de actuele verdamping te komen. In het kader van deze studie is bij diverse meteorologische bedrijven en instellingen geïnventariseerd (i) waar en welke huidige data met betrekking tot Penman-Monteith wordt gemeten en (ii) welke eventuele ruimtelijke interpolatiemethoden reeds worden gebruikt.

Deze studie heeft geleid tot een duidelijk overzicht over de huidige stand van zaken in Nederland tot de mogelijkheid voor het vlakdekkend schatten van de Penman-Monteith referentieverdamping in Nederland. Hiermee kan een stap worden gezet richting een betere vlakdekkende inschatting van de actuele verdamping. In dit rapport zijn een aantal concrete aanbevelingen gegeven zowel voor de korte- als de lange termijn.



Samenvatting

In Nederland verdampt jaarlijks gezien meer dan de helft, ongeveer 70%, van de neerslag. Daarmee is verdamping na neerslag de belangrijkste term van de waterbalans. In tegenstelling tot neerslag is het proces van verdamping niet direct waarneembaar en meetbaar. Kortom, verdamping is een zeer belangrijke maar moeilijk in te schatten variabele voor hydrologen.

In maart 2009 heeft FutureWater in opdracht van STOWA een definitiestudie uitgevoerd voor de verbetering van de actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer (Droogers, 2009). In dit rapport zijn een viertal concrete aanbevelingen gegeven:

1. Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten
2. Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren
3. Referentieverdamping verbeteren
4. Operationeel meten actuele verdamping

Dit rapport gaat nader in op punt 3, referentieverdamping verbeteren. De referentieverdamping wordt bijna altijd gebruikt voor het bepalen van de actuele verdamping. In de definitiestudie naar verbetering van de actuele verdamping wordt aangegeven dat er een brede discussie zou moeten worden opgestart of het wenselijk is om van Makkink (de huidige standaard in Nederland) over te stappen naar Penman-Monteith (de internationaal aanbevolen standaard). Daarnaast zou de referentieverdamping verder geregionaliseerd moeten worden.

STOWA heeft FutureWater gevraagd een studie uit te voeren met als doel:

Inventarisatie naar de mogelijkheden voor het regionaliseren van de referentieverdamping volgens Penman-Monteith

Om tot dit doel te komen zijn de volgende stappen ondernomen:

1. Inventarisatie van huidige data waarmee Penman-Monteith referentieverdamping kan worden berekend
2. Inventarisatie van mogelijke methoden om tot landsdekkende Penman-Monteith referentieverdamping te komen
3. Aangeven van de mogelijkheden en het belang om Penman-Monteith referentieverdamping in Nederland te bepalen, nu en in de toekomst.

De inventarisatie naar beschikbare data en gebruikte interpolatiemethoden is uitgevoerd onder een aantal meteorologisch gerelateerde organisaties binnen Nederland.

De belangrijkste bevinding van deze studie is dat voor elk meetstation van het KNMI waar momenteel de Makkink referentieverdamping wordt bepaald, het ook mogelijk is om de Penman-Monteith referentie te bepalen.

Om voor heel Nederland vlakdekkend de Penman-Monteith referentieverdamping te krijgen is het noodzakelijk de invoergegevens ruimtelijk te interpoleren. Tijdens de inventarisatie onder meteorologisch gerelateerde organisaties is gebleken dat er op meerdere plaatsen ook temperatuur en relatieve luchtvochtigheid wordt gemeten. Verder blijkt dat het KNMI als speerpunt het ruimtelijke interpoleren van meteorologische variabelen heeft. WaterWatch heeft als enige organisatie een operationeel algoritme om meteorologische variabelen te interpoleren. Dit algoritme is echter niet beschikbaar. In dit rapport worden concrete aanbevelingen gegeven voor ruimtelijke interpolatie, waarbij ook is aangegeven welke satellieten mogelijk gebruikt zouden kunnen worden.



De belangrijkste aanbevelingen die uit deze studie komen, zijn uitgesplitst in korte- en lange termijn aanbevelingen.

Korte termijn

- Publicatie van zowel Makkink referentieverdamping als Penman-Monteith referentie verdamping met de methode zoals aangegeven door FAO 56 (Allen et al., 1998)
- Publiceren gewasfactoren voor Penman-Monteith (literatuur studie)
- Studie naar bepaling van netto straling uit huidige meetgegevens
- Meten van netto straling op de KNMI automatische weerstations

Lange termijn

- Direct bepalen Penman-Monteith potentiële verdamping (niet meer de tussenstap referentieverdamping naar potentiële verdamping via gewasfactoren)
- Eén verantwoordelijke organisatie voor verzamelen en beschikbaar stellen van verdampingsgegevens binnen de hydrologische gemeenschap
- Vergelijking van interpolatiemethoden waarbij ook, hoewel niet beschikbaar, MeteoLook wordt meegenomen.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
2	Referentieverdamping	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Gewasfactoren-methode	12
2.3	Eenheden	13
2.4	Stralingsbalans	13
2.5	Makkink	16
2.5.1	Gehanteerde formule	16
2.5.2	Verdampingswarmte	17
2.5.3	Empirische constante 0,65	17
2.5.4	Psychrometerconstante	18
2.5.5	Helling van de dampspanningscurve	18
2.5.6	Globale straling	19
2.5.7	Benodigde gegevens voor Makkink	19
2.5.8	Beschikbaarheid Makkink referentieverdamping	19
2.6	Penman-Monteith	19
2.6.1	Gehanteerde formule	19
2.6.2	Helling van de dampspanningscurve	21
2.6.3	Netto straling	21
2.6.4	Bodemwarmteflux	23
2.6.5	Psychrometerconstante	23
2.6.6	Temperatuur	23
2.6.7	Windsnelheid	23
2.6.8	Dampspanningstekort	24
2.6.9	Benodigde gegevens voor Penman-Monteith	25
2.6.10	Beschikbaarheid Penman-Monteith referentieverdamping	25
2.7	Makkink versus Penman-Monteith	25
3	Inventarisatie	27
3.1	Algemeen	27
3.2	Samenvatting resultaten	27
3.2.1	KNMI	27
3.2.2	Meteo Consult	28
3.2.3	WeerOnline	29
3.2.4	WeatherNews	30
3.2.5	WaterWatch	30
3.2.6	NEO	31
3.2.7	EARS	32
4	Beschikbare gegevens	33
4.1	Algemeen	33
4.2	Puntdata	33
4.2.1	Algemeen	33
4.2.2	Variabelen Penman-Monteith	33
4.2.3	Additionele windmetingen KNMI	34
4.2.4	Bedekkingsgraad	34
4.2.5	Meteo Consult netwerk	37
4.3	Satelliet bronnen	37
4.4	Inventarisatie van datakosten	38



5	Ruimtelijke interpolatiemethoden	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Inventarisatie	41
5.3	Thiessen methode	42
5.4	Splines	42
5.5	Inverse Distance Weighting	42
5.6	Kriging	42
	5.6.1 Simple Kriging	43
	5.6.2 Ordinary Kriging	43
	5.6.3 Kriging met hulpvariabelen	43
5.7	MeteoLook	44
6	Conclusies en Aanbevelingen	45
6.1	Conclusies	45
6.2	Aanbevelingen	46
7	Referenties	47



Tabellen

Tabel 1. Geraadpleegde organisaties met daarbij vermeld de namen van de personen met wie is gesproken.	27
Tabel 2. Informatie over satellieten die bruikbaar kunnen zijn voor de ruimtelijke interpolatie van Penman-Monteith verdamping.	38
Tabel 3: Lijst met stations waar windmetingen plaatsvinden die afwijkend zijn van de standaardhoogte van 10 m. (Wever en Groen, 2009). Voor de ligging van de stations zie Figuur 8.	50

Figuren

Figuur 1. Langjarig gemiddelde jaarlijkse neerslag (links) en referentieverdamping volgens Makkink (rechts). (Bron: KNMI, 2000)	11
Figuur 2. Schematische weergave van de stralingsbalans van het aardoppervlak (Bron: Nasa)	14
Figuur 3. Elektromagnetisch spectrum (Bron: ESA) met daarin aangegeven de range voor kortgolvlige straling (K) en langgolvlige straling (L).	15
Figuur 4. Ratio stralingsterm/aerodynamische term van Penman-Monteith referentieverdamping als functie van de tijd. De rode lijn geeft aan wanneer beide termen even belangrijk zijn.	21
Figuur 5. Penman-Monteith referentie verdamping zoals deze wordt berekend door Meteo Consult. Voorbeeld voor 22 juli 2009. Met een gele ster is de globale ligging van de stralingsmeetpunten aangegeven. (Bron: Meteo Consult).....	29
Figuur 6. Referentieverdamping volgens Penman-Monteith (links) en actuele verdamping volgens SEBAL (rechts) zoals deze worden berekend door WaterWatch. Voorbeeld voor 22 juli 2009. N.B. de kleurenschaal verschilt per plaatje.	31
Figuur 7. Actuele verdamping gedurende 2006 voor Nederland volgens de EWBMS methode van EARS.	32
Figuur 8: Locaties van de automatische weerstations van het KNMI. Per benodigde variabele voor Penman-Monteith is aangegeven of deze wel (groen) of niet (rood) wordt gemeten. Referentiedatum: 1 september 2009, bron: www.knmi.nl/klimatologie	35
Figuur 9. Locaties van de windstations, inclusief windpalen op zee en boorplatforms (Wever en Groen, 2009).	36
Figuur 10. Locaties van de KNMI automatische weerstations waar wel (groen) en niet (rood) de bedekkingsgraad wordt gemeten. Referentiedatum: 1 september 2009.	36
Figuur 11. Relatieve luchtvochtigheid (links) en temperatuur (rechts) vlakdekkend voor heel Nederland berekend m.b.v. MeteoLook. Voorbeeld voor 22 juli 2009. (Bron: WaterWatch).	44





1 Inleiding

In Nederland verdampt jaarlijks gezien meer dan de helft, ongeveer 70%, van de neerslag. Daarmee is verdamping na neerslag de belangrijkste term van de waterbalans. In tegenstelling tot neerslag is het proces van verdamping niet direct waarneembaar en meetbaar. Kortom, verdamping is een zeer belangrijke maar moeilijk in te schatten variabele voor hydrologen.

In maart 2009 heeft FutureWater in opdracht van STOWA een definitiestudie uitgevoerd voor de verbetering van de actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer (Droogers, 2009). In dit rapport zijn een viertal concrete aanbevelingen gegeven:

1. Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten
2. Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren
3. Referentieverdamping verbeteren
4. Operationeel meten actuele verdamping

Dit rapport gaat nader in op punt 3, referentieverdamping verbeteren. De referentieverdamping wordt bijna altijd gebruikt voor het bepalen van de actuele verdamping. In de definitiestudie naar verbetering van de actuele verdamping wordt aangegeven dat er een brede discussie zou moeten worden opgestart of het wenselijk is om van Makkink (de huidige standaard in Nederland) over te stappen naar Penman-Monteith (de internationaal aanbevolen standaard). Daarnaast zou de referentieverdamping verder geregionaliseerd moeten worden.

STOWA heeft FutureWater gevraagd een studie uit te voeren met als doel:

Inventarisatie naar de mogelijkheden voor het regionaliseren van de referentieverdamping volgens Penman-Monteith

Om tot dit doel te komen zijn de volgende stappen ondernomen:

1. Inventarisatie van huidige data waarmee Penman-Monteith referentieverdamping kan worden berekend
2. Inventarisatie van mogelijke methoden om tot landsdekkende Penman-Monteith referentieverdamping te komen
3. Aangeven van de mogelijkheden en het belang om Penman-Monteith referentieverdamping in Nederland te bepalen, nu en in de toekomst.

De inventarisatie naar beschikbare data en gebruikte interpolatiemethoden is uitgevoerd onder een aantal meteorologisch gerelateerde organisaties binnen Nederland.

Hoofdstuk 2 van dit rapport behandelt allereerst de verschillende definities van verdamping als ook de stralings- en energiebalans die aan verdamping ten grondslag ligt. Vervolgens wordt uitgebreid ingegaan op zowel de Makkink als de Penman-Monteith methode. Voor beide methoden is een toelichting gegeven op alle variabelen. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten behandeld van de inventarisatie onder weergegerelateerde instituten in Nederland. De huidige beschikbaarheid van gegevens ten behoeve van Penman-Monteith wordt gegeven in Hoofdstuk 4. Vervolgens wordt in Hoofdstuk 5 ingegaan op interpolatiemethoden die veelal worden gebruikt om tot een vlakdekkende meteorologische gegevens te komen. Tot slot worden in Hoofdstuk 6 de belangrijkste conclusies van deze studie vermeld en worden een aantal concrete aanbevelingen voor zowel de korte als de lange termijn gedaan ten aanzien van het toepassen van de Penman-Monteith methode.

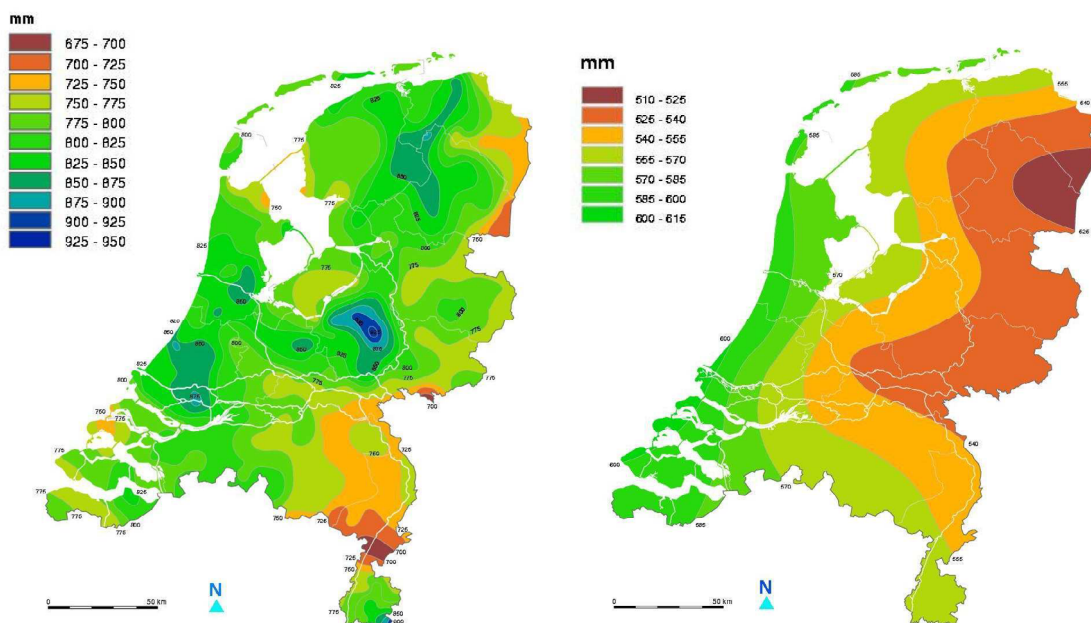




2 Referentieverdamping

2.1 Inleiding

Het is belangrijk om de algemeen gebruikte term 'verdamping' te specificeren. Het eerste onderscheid dat moet worden gemaakt is of er gerefereerd wordt aan de actuele- de potentiële- of referentieverdamping. De stelling dat jaarlijks 70% van de neerslag in Nederland verdampt (zie Hoofdstuk 1) is gebaseerd op een langjarig gemiddelde reeks over het tijdvak 1971-2000 van referentieverdamping (Figuur 1). Deze referentieverdamping is bepaald met de methode van Makkink. De potentiële verdamping is de maximale verdamping die kan plaatsvinden onder de heersende meteorologische condities. Er wordt dus vanuit gegaan dat het referentiegewas geen stress ondervindt door water- en nutriëntentekort.



Figuur 1. Langjarig gemiddelde jaarlijkse neerslag (links) en referentieverdamping volgens Makkink (rechts). (Bron: KNMI, 2000)

Hoeveel water er in werkelijkheid verdampt, de actuele verdamping, is afhankelijk van het landgebruik en de heersende hydrologische omstandigheden. De actuele verdamping kan hierdoor, vooral in de zomer, sterk afwijken van de referentieverdamping. In een recente studie naar de verbetering van actuele verdamping worden de huidige mogelijkheden voor het meten van actuele verdamping weergegeven. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de methoden die de meest gangbare modellen binnen Nederland gebruiken om actuele verdamping te bepalen. In dit rapport wordt alleen ingegaan op de referentieverdamping.

Voor het bepalen van de referentieverdamping worden diverse methoden gebruikt (Winter et al., 1995). Sinds 1987 geldt Makkink (paragraaf 2.5) als de standaard binnen Nederland om de referentieverdamping te bepalen. In 1990 heeft het wereldvoedsel organisatie van de Verenigde Naties (FAO) verschillende verdampingsmethoden met elkaar vergeleken. Een team van

deskundigen heeft toen geadviseerd de Penman-Monteith methode als nieuwe standaard voor referentieverdamping te hanteren (paragraaf 2.6). In dit rapport wordt daarom alleen ingegaan op deze twee methoden.

Definitie verschillende verdampingstermen zoals gedefinieerd in Hydrologische Woordenlijst (NHV, 2002). Deze zijn op internet te vinden via http://www.idsw.nl/standaarden/woordenboek/aquo-lex_-_begrippen/

Werkelijke verdamping

De (totale) verdamping van een al of niet begroeid oppervlak.

Totale verdamping

De som van de interceptieverdamping, de transpiratie en de bodemverdamping

Evapotranspiratie

De totale verdampingssnelheid van een begroeid oppervlak. Gebruik kan verwarring geven, beter is: totale verdamping.

Interceptieverdamping

Deel van bruto neerslag dat door de vegetatie of andere structuren wordt onderschept en dat vervolgens verdampt.

Transpiratie

Het gedeelte van de totale verdamping dat vanuit de bodem via de planten (huidmondjes en cuticula) in de atmosfeer komt.

Bodemverdamping

De verdampingstroombichtheid vanuit de bodem.

Referentie gewasverdamping

De verdamping van een uitgebreid uniform, van buiten droog grasoppervlak met een hoogte van 8-15 cm dat voldoende van water is voorzien. Deze wordt thans met behulp van de vergelijking van Makkink berekend.

Potentiële verdamping

De theoretische verdamping die zou optreden wanneer een oppervlak dat voldoende van water is voorzien, blootgesteld wordt aan de heersende meteorologische omstandigheden die onveranderd blijven door het verdampingsproces zelf

Actuele verdamping

Staat niet gedefinieerd in hydrologische woordenlijst maar is synoniem aan werkelijke verdamping

2.2 Gewasfactoren-methode

In Nederland houden de meeste hydrologische toepassingen, voornamelijk binnen de hydrologische modellen, verband met de zogenaamde gewasfactoren-methode. Hierbij wordt de referentieverdamping vermenigvuldigd met een gewasfactor om zodoende tot een potentiële verdamping van een gewas te komen. Voor gras wordt doorgaans voor een groot deel van het



jaar een waarde van 1.0 gekozen als gewasfactor, waardoor de referentie verdamping van gras gelijk is aan de potentiële verdamping van gras. Voor andere gewassen is dit vaak niet het geval. Daarnaast kan de gewasfactor per gewas ook variëren door het jaar heen.

De gewasfactoren horen bij de wijze waarop de referentieverdamping wordt bepaald. Aangezien de Makkink momenteel als standaard geldt binnen Nederland wordt meestal gebruik gemaakt van de Feddes gewasfactoren (Feddes, 1987). Deze maar ook andere gewasfactoren geldig voor Makkink zijn voor een aantal gewassen gepubliceerd in het STOWA rapport 2009-11 (Droogers, 2009). Aangezien internationaal Penman-Monteith als standaard geldt, zijn in de literatuur gewasfactoren voor Penman-Monteith te vinden. Aanbevolen wordt deze gewasfactoren te verzamelen door middel van een literatuurstudie en vervolgens te publiceren.

2.3 Eenheden

Verdamping is een proces dat zowel voor meteorologen als hydrologen van groot belang is. Aangezien de energiebalans van het aardoppervlak (Verg. 1) aan de basis van verdamping ligt, wordt in de literatuur verdamping vaak uitgedrukt als energieflex ($W m^{-2}$). Hydrologen werken echter voornamelijk met de volume eenheid mm, wat een uitdrukking is van het volume per oppervlakte ($1mm = 1 \cdot 10^{-3} m^3 m^{-2} = 1 \text{ liter } m^{-2}$).

In dit rapport wordt zoveel mogelijk uitgegaan van de hydrologische toepassing en zal de verdamping in volume eenheden worden uitgedrukt. Zie kader voor het omrekenen van vaak voorkomende eenheden.

Omrekeningstabel

Hier worden een aantal eenheden gegeven die men regelmatig kan tegenkomen in de literatuur ten aanzien van verdamping

$$1 W = 1 J s^{-1} = 86400 J d^{-1}$$

$$1 N = 1 kg m s^{-1}$$

$$1 Pa = 1 N m^{-2}$$

$$1 cal = 4.1868 J$$

$$1 kWh = 3.6 \cdot 10^6 J$$

$$1 mbar = 100 Pa$$

$$1 atm = 1.0133 \cdot 10^5 Pa = 1013.3 mbar$$

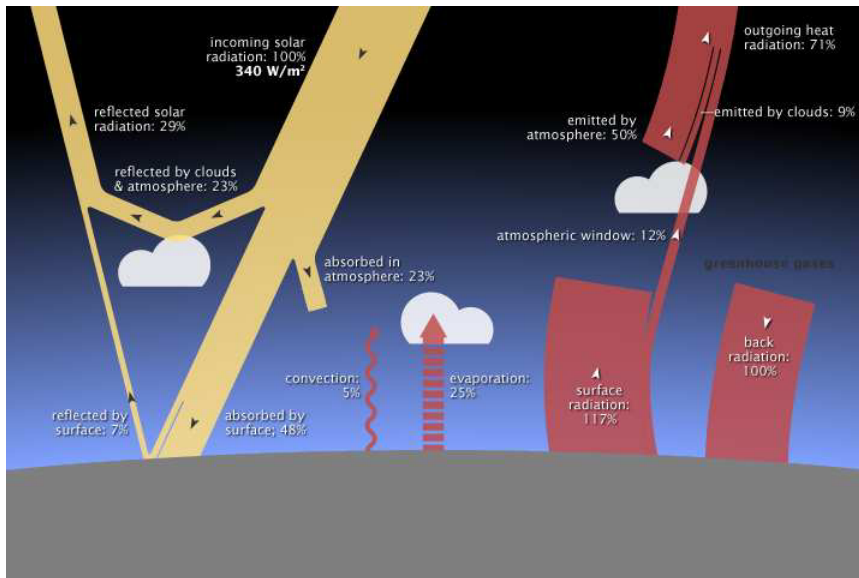
$$1 K = 273.15 ^\circ C$$

2.4 Stralingsbalans

De belangrijkste drijvende kracht achter het verdampingsproces op aarde is zonnestraling. De energie afkomstig van de zonnestraling die het aardoppervlak bereikt verlaat deze ook weer. Dit wordt de stralings- of energie balans van het aardoppervlak genoemd. Zonder de stralingsbalans zou de aarde opwarmen of afkoelen. Gezien het belang van straling in het verdampingsproces wordt in deze paragraaf dieper op de stralingsbalans van het aardoppervlak ingegaan. In Figuur 2 wordt de stralingsbalans van het aardoppervlak schematisch weergegeven. Slechts een deel van de zonnestraling bereikt het aardoppervlak (circa 48%). Dit wordt ook wel de **kortgolvlige of globale straling** genoemd. Deze straling wordt deels door het aardoppervlak geabsorbeerd en deels gereflecteerd. Hoeveel straling wordt gereflecteerd hangt



af van landgebruik en wordt uitgedrukt in het zogenaamde albedo. Doordat het aardoppervlak wordt opgewarmd zendt de aarde zelf ook straling uit. Deze straling heeft echter een grotere golflengte en wordt daarom ook wel de **langgolvlige straling** genoemd.



Figuur 2. Schematische weergave van de stralingsbalans van het aardoppervlak (Bron: Nasa)

Voor het verdampingsproces is het gedeelte tussen de 0,1 - 50 μm het belangrijkste, waarbij de kortgolvlige straling tussen ongeveer 0,1 – 3 μm ligt en de langgolvlige straling tussen de 3 - 50 μm (De Bruin, 1996). In Figuur 3 is het elektromagnetisch spectrum weergegeven met daarin aangegeven waar de kortgolvlige (K) en langgolvlige (L) straling ligt.

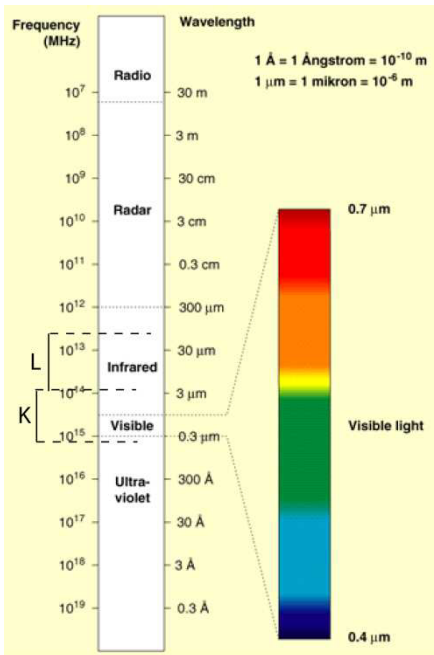
Het fundamentele uitgangspunt van de verdamping wordt gegeven door de energiebalansvergelijking (Verg. 1). Deze energiebalans geeft simpelweg aan dat alle beschikbare straling wordt verdeeld in een drietal processen: verdampen van water (λE), opwarmen van de lucht (H) en opwarmen van de bodem (G):

$$Q_n = \lambda E + H + G \tag{1}$$

Waarin:

- Q_n netto straling (W m^{-2})
- λ verdampingswarmte van water (J kg^{-1})
- E verdampingsflux ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- H voelbare warmteflux (W m^{-2})
- G bodemwarmteflux (W m^{-2})





Figuur 3. Elektromagnetisch spectrum (Bron: ESA) met daarin aangegeven de range voor kortgolvlige straling (K) en langgolvlige straling (L).

De netto straling is de som van het verschil tussen inkomende en uitgaande kortgolvlige en langgolvlige straling (Verg. 2)

$$Q_{\text{net}} = K^{\downarrow} - K^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad 2.$$

- Q_{net} netto straling (W m^{-2})
- K^{\downarrow} inkomende kortgolvlige straling (W m^{-2})
- K^{\uparrow} uitgaande kortgolvlige straling (W m^{-2})
- L^{\downarrow} inkomende langgolvlige straling (W m^{-2})
- L^{\uparrow} uitgaande langgolvlige straling (W m^{-2})

Een deel van de inkomende kortgolvlige straling wordt door het aardoppervlak weerkaatst. Hoeveel straling wordt weerkaatst hangt af van eigenschappen van het aardoppervlak en wordt uitgedrukt in albedo (α). Dit is een dimensieloos getal tussen 0 en 1. Sneeuw heeft bijvoorbeeld een albedo van 0,95 en een kale grond (vochtig) een albedo van 0,05. Een groen gewas heeft een albedo van ongeveer 0,20 - 0,25 (Allen et al., 1998). Appendix 1 geeft een inzicht in albedo waarden van verschillende oppervlakken (De Bruin, 1996).

$$K^{\uparrow} = \alpha \cdot K^{\downarrow} \quad 3.$$

α albedo [-]

De langgolvlige straling is voornamelijk afkomstig van de aarde. Wolken kunnen er echter voor zorgen dat een deel van deze uitgestraalde langgolvlige straling wordt weerkaatst naar het aardoppervlak. Om deze reden koelt het aardoppervlak minder snel af indien er bewolking aanwezig is.



Zowel langgolvlige als kortgolvlige straling zijn op het aardoppervlak te meten met meteorologische meetinstrumenten. Daarnaast is er ook de mogelijkheid om de straling afkomstig van het aardoppervlak te meten met behulp van satellietbeelden. In Hoofdstuk 4 nader ingegaan op de mogelijkheden om straling te meten.

Voor de methode Makkink wordt gebruik gemaakt van de inkomende kortgolvlige straling, ook wel de globale straling genoemd. Voor de methode van Penman-Monteith is echter de netto straling nodig.

Definitie Globale en Netto straling

Globale straling is de inkomende kortgolvlige straling (0,1 – 3 μm) en is afkomstig van de zon. Netto straling is de balans tussen inkomende en uitgaande kortgolvlige en langgolvlige straling (0,1-50 μm).

2.5 Makkink

2.5.1 Gehanteerde formule

Sinds 1987 geldt Makkink (Verg. 4) als de standaard binnen Nederland om de referentieverdamping te bepalen. Deze methode lijkt veel op de internationaal meer bekende Priestley en Taylor formule (Priestley and Taylor, 1972). In het rapport 'Van Penman naar Makkink' (De Bruin, 1988) is aangegeven wat de overwegingen waren om destijds over te stappen. In dit rapport wordt vermeld dat het KNMI van 1956 tot 1 april 1987 routinematig verdampingsgetallen verstrekten die zijn berekend met de Penman formule. Deze grootheid wordt veelal de "open waterverdamping" (E_0) genoemd. De belangrijkste reden om over te stappen naar de Makkink formule was het feit dat gedurende de periode 1956-1987 door diverse oorzaken verschillende reeksen getallen van E_0 in omloop waren die niet alle op dezelfde wijze waren bepaald. Dit gaf aanleiding tot verwarring. Begin 1983 heeft het Klein Comité van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO) daarom aan de hoofddirecteur van het KNMI verzocht om over te gaan tot een nadere beschouwing van de verdampingsgetallen. Het KNMI heeft vervolgens na onderzoek besloten om per 1 april 1987 de Makkink formule te hanteren voor de routinematige berekening van de zogenaamde referentiegewasverdamping. In het rapport (De Bruin, 1988) is aangegeven dat deze Makkink formule voldoet aan een aantal voorwaarden:

- Het levert een verdampingsgetal dat vergelijkbaar is met E_0
- De berekening is eenvoudig en het aantal benodigde meteorologische invoergegevens klein
- De formule bevat weinig empirische waarden
- De berekeningswijze al op fysische gronden waarschijnlijk niet spoedig behoeven te worden vervangen.

Verder worden de volgende punten in het rapport (De Bruin, 1988) aangegeven:

- Voor een nauwkeuriger berekening van de gewasverdamping wordt voorlopig de Penman-Monteith-Rijtema vergelijking (Rijtema, 1965) aanbevolen. Voor deze verdampingsberekening zijn veel meer meteorologische invoergegevens nodig dan voor de Makkink formule. Daarom moet men naast de meteorologische gegevens die voor de Makkink formule nodig zijn ook andere meteorologische variabelen blijven meten en beschikbaar stellen.



- Voor de winter levert noch de Penman, noch de Makkink formule betrouwbare gegevens omtrent de verdamping op. Aanbevolen wordt om in de winter voor de berekening van de gewasverdamping gebruik te maken van de Thom-Oliver versie van de Penman-Monteith vergelijking. Wel is besloten om als zeer ruw cijfer voor de verdamping in de winterperiode ook het referentie-gewasverdampinggetal volgens Makkink te verstrekken.
- Nader verdampingsonderzoek is nodig ten aanzien van (i) de winterperiode, (ii) stedelijke gebieden en (iii) de kuststrook.

De argumenten die hebben geleid tot de toepassing van de formule van Makkink gelden alleen voor het 'zomerseizoen' van april tot en met september; de straling is dan de grootste drijvende kracht achter de verdamping. In de winter geldt dit niet en de fysische basis voor de Makkink formule ontbreekt dan (De Bruin, 1988).

$$\lambda \cdot \rho \cdot ET_{ref} = 0,65 \cdot \frac{s}{s + \gamma} \cdot K^{\downarrow} \quad 4.$$

Waarin:

- λ : verdampingswarmte van water (J kg^{-1})
- ρ : soortelijk gewicht van water (1000 kg m^{-3})
- ET_{ref} : referentie verdamping (m d^{-1})
- γ : psychrometerconstante (op zeeniveau $\sim 0.066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- s : helling van de dampspanningscurve ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- K^{\downarrow} : dagsom globale straling ($\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

In de volgende paragrafen worden alle variabelen en constanten van de Makkink formule verder toegelicht.

2.5.2 Verdampingswarmte

De verdampingswarmte van water is de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 kg water te verdampen en afhankelijk van de temperatuur (Verg. 5).

$$\lambda = (2501 - 2,375 \cdot T) \cdot 1000 \quad 5.$$

Waarin:

- λ : verdampingswarmte van water (J kg^{-1})
- T : temperatuur ($^\circ\text{C}$)

De temperatuur wordt door het KNMI gemeten op 1,50 m hoogte boven het maaiveld op ongeveer 35 locaties in Nederland (zie hoofdstuk 4). De waarden worden verkregen met behulp van elektrische sensoren.

2.5.3 Empirische constante 0,65

De Makkink methode zoals deze sinds 1987 wordt toegepast (Verg. 4) is een vereenvoudiging van de oorspronkelijke Makkink formule waarin 2 empirische constanten zitten (Makkink, 1957). De vereenvoudigde formule met daarin de constante 0,65 is geïntroduceerd door De Bruin (1981, 1987) die deze constante heeft bepaald op basis van experimenten die plaatsvonden in de jaren '70 en '80 met een goed van water voorzien grasgewas bij Cabauw (Jacobs en De Bruin, 1998).



2.5.4 Psychrometerconstante

De psychrometerconstante hangt af van de luchtdruk, en is dus afhankelijk van de hoogte. Allen et al. 1998 geeft een formule om de druk als functie van de hoogte te bepalen (Verg 6). Deze druk kan vervolgens worden gebruikt om de psychrometrische constante te berekenen (Verg. 7). Deze relatie tussen psychrometerconstante en hoogte is echter zeer zwak, bij 1000 m hoogteverschil treedt er een verschil van 10% op.

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad 6.$$

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\epsilon \cdot \lambda} \approx 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad 7.$$

Waarin:

- P: atmosferische (lucht-) druk ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- z: hoogte boven zeeniveau (m)
- γ : psychrometer constante ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- c_p : specifieke warmte bij constante druk ($1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- ϵ : ratio moleculair gewicht waterdamp/droge lucht = 0,622
- λ : verdampingswarmte van water: Verg.5 ($\sim 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$)

Het KNMI gebruikt bij het berekenen van de Makkink (Verg. 4) verdamping zoals deze worden gepubliceerd in het Maandoverzicht van Neerslag en Verdamping een relatie die afhankelijk is van de temperatuur (Verg. 8)

$$\gamma = 0,0646 + 0,00006 \cdot T \quad 8.$$

Waarin:

- γ : psychrometer constante ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- T: daggemiddelde temperatuur ($^\circ\text{C}$)

2.5.5 Helling van de dampspanningscurve

De helling van de dampspanningscurve (s) kan worden afgeleid uit de daggemiddelde temperatuur (Allen et al, 1998; Verg. 9). Voor dagelijkse (24-uur) perioden geeft Allen et al. 1998 aan dat voor standaardisatie de gemiddelde temperatuur bepaald moet worden door middel van de minimum en maximum temperatuur (Verg. 10) in plaats van het gemiddelde van uurlijkse waarnemingen.

$$s = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp \left(\frac{17,27 \cdot T_{gem}}{T_{gem} + 237,3} \right) \right]}{(T_{gem} + 237,3)^2} \quad 9.$$

$$T_{gem} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad 10.$$

Waarin:



- s: helling van de dampspanningscurve (kPa °C⁻¹)
- T_{gem} : daggemiddelde temperatuur (°C)
- T_{max} : dagelijkse maximum temperatuur (°C)
- T_{min} : dagelijkse minimum temperatuur (°C)
- exp(..) 2,7183 (natuurlijk logaritme) tot de macht (..)

Het KNMI gebruikt bij het berekenen van de Makkink verdamping zoals deze worden gepubliceerd in het Maandoverzicht van Neerslag en Verdamping een iets andere vergelijking (Verg. 11 en 12)

$$s = \frac{7,5 \cdot 237,3}{(237,3 + T)^2} \cdot \ln 10 \cdot e_s \quad 11.$$

$$e_s = 0,6107 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad 12.$$

Waarin:

- s: helling van de dampspanningscurve (kPa °C⁻¹)
- e_s : verzadigde dampspanning t.o.v. water (kPa)
- T: daggemiddelde temperatuur (°C)

2.5.6 Globale straling

De globale straling wordt door het KNMI op 32 stations gemeten met behulp van pyranometers (Figuur 8).

Een andere mogelijkheid om de globale straling (ruimtelijk verdeeld) te bepalen is met behulp van satellietmetingen. In hoofdstuk 4 wordt hier verder op ingegaan.

2.5.7 Benodigde gegevens voor Makkink

Uit bovenstaande blijkt dat voor het afleiden van de Makkink referentieverdamping het meten van de temperatuur en globale straling voldoende is. Eventueel zijn metingen van de druk gewenst voor een nauwkeurigere bepaling van de psychrometrische constante.

2.5.8 Beschikbaarheid Makkink referentieverdamping

Op alle stations van het KNMI waar de globale straling wordt gemeten (32 locaties, Figuur 8) wordt dagelijks de Makkink verdamping berekend. Dit zijn dus puntgegevens. Het KNMI verstrekt geen vlakdekkende dagelijkse Makkink verdamping.

2.6 Penman-Monteith

2.6.1 Gehanteerde formule

De argumenten die hebben geleid tot de toepassing van de formule van Makkink gelden alleen voor het 'zomerseizoen' van april tot en met september; de straling is dan de grootste drijvende kracht achter de verdamping. In de winter geldt dit niet en de fysische basis voor de Makkink



formule ontbreekt dan (De Bruin, 1988). In 1990 heeft de wereldvoedsel organisatie van de Verenigde Naties (FAO) verschillende verdampingsmethoden met elkaar vergeleken. Een team van deskundigen heeft toen geadviseerd de Penman-Monteith methode als nieuwe standaard voor referentieverdamping te hanteren (Allen et al., 1998). Deze Penman-Monteith formule dient niet verward te worden met de Penman formule waarvan het KNMI in 1987 van af is gestapt (zie paragraaf 2.5.1). Verg. 13 geeft de formule voor de Penman-Monteith referentieverdamping. Deze is afgeleid uit de volledige Penman-Monteith vergelijking waarbij wordt aangenomen dat we te maken hebben met een referentie gewas (zie kader).

$$ET_{ref} = \frac{0,408 \cdot s \cdot (Q_{net} - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T} \cdot u_2 \cdot [e_s - e_a]}{s + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad 13.$$

waarin:

ET_{ref}	referentie verdamping ($m \cdot d^{-1}$)
s	helling van de dampspanningscurve ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)
Q_{net}	netto straling ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
G	bodemwarmtestroom ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
γ :	psychrometerconstante (op zeeniveau $\sim 0,066 \cdot kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)
T	temperatuur op 2 m hoogte ($^\circ C$)
u_2	daggemiddelde windsnelheid op 2 m hoogte ($m \cdot s^{-1}$)
e_s	verzadigingsdampdruk (kPa)
e_a	actuele dampdruk (kPa)
$e_s - e_a$	verzadigde dampspanningstekort (kPa)

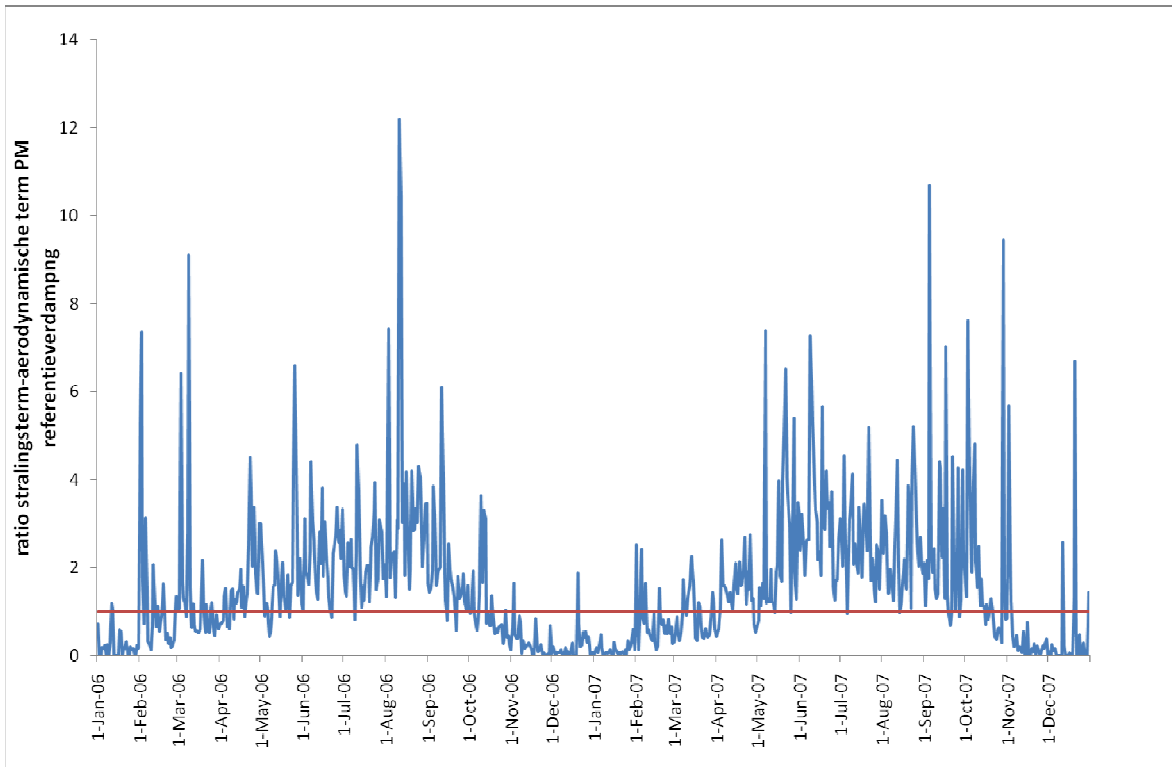
Referentie gewas Penman-Monteith

Voor het bepalen van de referentieverdamping volgens Penman-Monteith wordt uitgegaan van een standaardgewas dat een hoogte heeft van 0,12 meter, een vaste oppervlakteweerstand van $70 \cdot s \cdot m^{-1}$ en een albedo van 0,23 heeft.

Het eerste deel van de Penman-Monteith formule is de stralingsterm en het tweede deel de aerodynamische term (Feddes et al., 2004). Figuur 4 toont de verhouding van de stralingsterm t.o.v. de aerodynamische term van de Penman-Monteith referentieverdamping voor het jaar 2006 en 2007, gebaseerd op KNMI metingen van De Bilt. Figuur 4 laat duidelijk zien dat er een jaarlijkse gang in deze verhouding zit: in de zomerperiode is de stralingsterm over het algemeen belangrijker dan de aerodynamische term. Dagelijks kan de verhouding echter zeer variëren en ook op zomerse dagen kan de aerodynamische term net zo belangrijk zijn als de stralingsterm.

In de volgende paragrafen worden de variabelen van de Penman-Monteith formule (Verg. 13) toegelicht.





Figuur 4. Ratio stralingsterm/aerodynamische term van Penman-Monteith referentieverdamping als functie van de tijd. De rode lijn geeft aan wanneer beide termen even belangrijk zijn.

2.6.2 Helling van de dampspanningscurve

De helling van de dampspanningscurve (s) kan worden afgeleid uit de daggemiddelde temperatuur (Verg. 9 of Verg. 11).

2.6.3 Netto straling

De globale straling (K^{\downarrow}) wordt door het KNMI op 32 stations gemeten met behulp van pyranometers (Figuur 8). Voor de netto straling is echter ook de uitgaande kortgolvlige straling evenals de in- en uitgaande langgolvlige straling nodig (Verg. 2). Zoals aangegeven in Verg. 3 kan de uitgaande kortgolvlige straling worden berekend uit de globale straling indien het albedo bekend is, waarmee de netto inkomende kortgolvlige straling kan worden berekend (Verg.14). Het albedo is afhankelijk van eigenschappen van het aardoppervlak (Appendix 1) en kan ruimtelijk worden bepaald met satellietmetingen. Voor de referentieverdamping van Penman-Monteith wordt echter een vaste waarde gehanteerd voor het albedo, te weten 0,23 (Allen et al., 1998).

$$K^{\downarrow} - K^{\uparrow} = (1 - \alpha) \cdot K^{\downarrow} \quad 14.$$

Waarin:

- $K^{\downarrow} - K^{\uparrow}$ netto inkomende kortgolvlige straling ($W\ m^{-2}\ d^{-1}$)
- α albedo (-)



De uitgaande langgolvlige straling is te berekenen uit de temperatuur van het aardoppervlak met behulp van de Stefan-Boltzmann wet. Deze wet geeft aan dat elk oppervlak met een temperatuur boven het absolute nulpunt (0 Kelvin) straling uitzendt. De **netto uitgaande langgolvlige straling** (uitgaande minus inkomende langgolvlige straling) is echter kleiner dan de uitgaande langgolvlige straling aangezien de wolken ook straling weerkaatsen. Langgolvlige straling wordt in Nederland niet gemeten. Voor praktische toepassingen zijn er empirische methoden ontwikkeld om de netto langgolvlige straling te berekenen uit standaard meteorologische waarnemingen. Allen et al. (1998) geeft een vergelijking om de netto langgolvlige straling te berekenen uit standaard meteorologische waarnemingen (Verg. 14).

$$L^{\uparrow} - L^{\downarrow} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \left(1,35 \cdot \frac{K^{\downarrow}}{K_0^{\downarrow}} - 0,35 \right) \quad 15.$$

Waarin:

$L^{\uparrow} - L^{\downarrow}$	netto uitgaande langgolvlige straling ($W m^{-2} d^{-1}$)
σ	Stefan-Boltzmann constante ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$)
T_{\max}	maximale luchttemperatuur gedurende dag (K)
T_{\min}	minimale luchttemperatuur gedurende dag (K)
e_a	daggemiddelde actuele dampdruk (Pa)
K^{\downarrow}	globale straling ($W m^{-2} d^{-1}$)
K_0^{\downarrow}	onbewolkte globale straling ($W m^{-2} d^{-1}$): zie Verg. 15-19

Allen et. al (1998) geeft een empirische relatie om de onbewolkte globale straling (K_0^{\downarrow}) te berekenen. Hiervoor is de extraterrestrische zonnestraling (K_{ext}) nodig die afhangt van de geografische locatie op aarde en de tijd van het jaar. Allen et. al (1998) geeft echter ook meer complexe berekeningsmogelijkheden voor onbewolkte globale straling waarbij waterdamp effecten worden meegenomen.

$$K_0^{\downarrow} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot K_{ext} \quad 16.$$

$$K_{ext} = \frac{G_{sc} \cdot d_r}{\pi} [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad 17.$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad 18.$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad 19.$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad 20.$$

Waarin:

K_0^{\downarrow}	onbewolkte globale straling ($W m^{-2} d^{-1}$)
z	stationshoogte t.o.v. zeeniveau (m)
K_{ext}	extraterrestrische zonnestraling ($W m^{-2} d^{-1}$)
G_{sc}	zonneconstante ($1366 W m^{-2} d^{-1}$)
d_r	inverse relatieve afstand aarde-zon (-)
ω_s	zonnehoek (rad)
φ	geografische breedte (rad)
δ	afbuiging zonnestraling (rad)
J	dagnummer in het jaar; 1 op 1 januari, 365 of 366 op 31 december (-)



De geografische breedte (φ) is positief voor het noordelijk halfrond en negatief voor het zuidelijk halfrond en wordt in bovenstaande formules uitgedrukt in radialen. De omrekening van decimale graden naar radialen wordt gegeven in Verg.20. Voor midden Nederland (Utrecht) is de breedteligging $52^{\circ}05'N$, wat dus overeenkomt met $((\pi/180) \cdot 52+05/60) = 0,908$ radialen.

$$\text{Radialen} = \frac{\pi}{180} \cdot \text{decimale graden} \quad 21.$$

Kortom, de netto straling (Verg. 2) kan worden bepaald op locaties waar (i) de temperatuur (ii) de globale straling en (iii) relatieve luchtvochtigheid worden gemeten. Dit is in Nederland het geval op 32 locaties (zie Figuur 8). Het KNMI gebruikt echter een andere methode om de netto straling (m.n. de netto langgolvlige straling) te bepalen, waarbij de gemeten bedekkingsgraad wordt meegenomen. In dat geval kan slechts op 24 locaties in Nederland de netto straling worden bepaald (zie Figuur 10 en paragraaf **Error! Reference source not found.**).

Een andere mogelijkheid om de netto straling (ruimtelijk) te bepalen is met behulp van satellietmetingen. In hoofdstuk 4 wordt hier verder op ingegaan.

2.6.4 Bodemwarmteflux

De bodemwarmteflux (G) is de energie die nodig is om de bodem op te warmen. Deze is positief als de bodem opwarmt en negatief als de bodem afkoelt. De bodem heeft een relatieve grote warmtecapaciteit. Het dagelijks verloop van de bodemwarmteflux is gecorreleerd aan het dagelijkse temperatuurverloop in de bodem. Deze vertoont gedurende de dag een sinusvormig verloop. Daarnaast is het type bodem en de bodemvochtigheid van belang aangezien deze de warmtegeleiding beïnvloeden. De Bruin (1996) gaat uitgebreid in op mogelijkheid om complexe bodemwarmteflux te berekenen. Vanwege de dagelijkse gang wordt vaak voor praktische toepassingen de bodemwarmteflux over de gehele dag gelijk gesteld aan nul.

2.6.5 Psychrometerconstante

De psychrometerconstante hangt af van de luchtdruk, en is dus afhankelijk van de hoogte. Echter gezien de zwakke relatie tussen psychrometerconstante en hoogte wordt deze grootheid over het algemeen constant verondersteld op $0.066 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Zie paragraaf 2.5.4 voor meer informatie.

2.6.6 Temperatuur

De temperatuur wordt door het KNMI gemeten op 1,50 m hoogte boven het maaiveld op ongeveer 35 locaties in Nederland (zie hoofdstuk 4). De waarden worden verkregen met behulp van elektrische sensoren.

2.6.7 Windsnelheid

Windsnelheden boven een oppervlakte verschillen als functie van hoogte boven het oppervlak. Wrijving van het oppervlak zorgt ervoor dat windsnelheden afnemen dicht bij het aardoppervlak. De windsnelheid neemt logaritmisches toe met de hoogte. Deze logaritmisches



relatie geldt echter alleen voor de oppervlaktelaag, wat is gedefinieerd als de laag tussen 2 à 3 maal de gewashoogte (de zgn. ruwheidslaag) en 50 meter (De Bruin, 1996).

De windsnelheid wordt door het KNMI volgens internationaal voorschrift gemeten op 10 m hoogte boven open terrein (grasland) op 34 stations (Figuur 8) alsmede op een aantal additionele stations (zie hoofdstuk 4). De waarden zijn verkregen met behulp van een anemometer. Over elk uurvak wordt de gemiddelde windsnelheid berekend en weergegeven in meters per seconde. Voor de agrohydrologie, en dus in de formule van Penman-Monteith is echter de windsnelheid op 2 m hoogte van belang. Allen et al, 1998 geeft een relatie waarmee windsnelheden die zijn gemeten op 'z' m hoogte kunnen worden vertaald naar windsnelheden op 2 meter hoogte (Verg 21).

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad 22.$$

Waarin:

- u_2 : windsnelheid op 2 m hoogte (m s^{-1})
- u_z : windsnelheid op z m hoogte (m s^{-1})
- z: hoogte van de windmeting (m)

2.6.8 Dampspanningstekort

Het dampspanningstekort is het verschil tussen actuele en verzadigde dampspanning. Dit geeft aan hoeveel water de lucht bij een bepaalde temperatuur nog kan opnemen en dus hoeveel de zogenaamde atmosferische vraag voor warmte is. Huidmondjes (stomata) van planten reageren hierop en gaan verder open bij lagere relatieve luchtvochtigheid. Kortom hoe groter het dampspanningstekort hoe meer verdamping er zal plaatsvinden.

Actuele dampspanning kan onmogelijk direct worden gemeten en wordt meestal afgeleid uit de relatieve luchtvochtigheid (RH). De relatieve luchtvochtigheid wordt door het KNMI gemeten op 1,50 m hoogte boven maaiveld op 34 stations in Nederland (Figuur 8). De waarden zijn verkregen met behulp van elektrische sensoren. De dampspanning heeft ook betrekking op een hoogte van 1,50 m boven maaiveld en wordt door het KNMI elk uur berekend uit gegevens van de temperatuur en van de relatieve vochtigheid.

De relatieve luchtvochtigheid is de verhouding tussen de actuele en verzadigde dampspanning (Verg. 22). De verzadigingsdampdruk (e_s) is een functie van alleen de temperatuur en kan worden bepaald t.o.v. water (e_w) of t.o.v. ijs (e_i). Voor RH wordt altijd de verzadigingsdampdruk t.o.v. water gebruikt. Deze kan worden berekend met de benaderingsformule zoals gegeven in Verg. 23 (De Bruin, 1996) of zoals gegeven in Verg. 24 en 25 (Allen et al, 1998).

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \quad 23.$$

Waarin:

- RH: relatieve luchtvochtigheid (- of %)
- e_a : actuele dampspanning (kPa)
- e_s : verzadigde dampspanning t.o.v. water (kPa), zie Verg. 23 of Verg. 25

$$e_s(T) = e_s(0) \cdot 10^{\frac{aT}{b+T}} \quad 24.$$



Waarin:

T	luchttemperatuur (°C)
a	7,5 (-)
b	237,3 (-)
$e_s(0)$	0,6107 (kPa)

$$e_s(0) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 273,3} \right] \quad 25.$$

$$e_s(T) = \frac{e_s(0), T_{max} + e_s(0), T_{min}}{2} \quad 26.$$

2.6.9 Benodigde gegevens voor Penman-Monteith

Uit bovenstaande blijkt dat voor het afleiden van de Penman-Monteith referentieverdamping het meten van de temperatuur, de globale straling, de relatieve luchtvochtigheid en de windsnelheid voldoende is. Het rechtstreeks meten van netto (langgolfige-) straling zou mogelijk een verbetering kunnen opleveren ten opzichte van de beschreven methode die deze empirisch afleidt uit de globale straling, de temperatuur en actuele dampdruk (Verg.14).

2.6.10 Beschikbaarheid Penman-Monteith referentieverdamping

Op alle 32 stations van het KNMI waarvoor het KNMI momenteel de Makkink referentieverdamping berekend kan ook de Penman-Monteith referentieverdamping worden berekend (zie ook hoofdstuk 4). Het KNMI berekent en verstrekt echter alleen dagelijkse Makkink referentieverdamping en geen Penman-Monteith referentieverdamping.

2.7 Makkink versus Penman-Monteith

De methode van Makkink, zoals deze momenteel binnen Nederland geldt als de standaard methode om referentieverdamping te bepalen, is een empirische formule welke alleen afhankelijk is van globale straling en temperatuur. Deze twee variabelen worden momenteel (referentiedatum 1 september 2009) gezamenlijk op 32 stations in Nederland door het KNMI gemeten. Voor deze 32 stations wordt door het KNMI de Makkink referentieverdamping verstrekt.

De methode van Penman-Monteith zoals deze momenteel internationaal geldt als de standaard methode om referentieverdamping te bepalen is een formule welke afhankelijk is van netto straling, temperatuur, wind en relatieve luchtvochtigheid. Met uitzondering van de netto straling worden deze variabelen door het KNMI gemeten. Aangezien de netto straling (indirect) te bepalen is uit de globale straling, de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid kan op alle stations waar momenteel de Makkink referentie verdamping wordt bepaald ook de referentieverdamping volgens Penman-Monteith worden bepaald.

Bij Makkink wordt ervan uitgegaan dat straling (en dan alleen de inkomende kortgolfige straling) de grootste drijvende kracht achter de verdamping is. Penman-Monteith neemt echter ook de aerodynamische term mee. Uit Figuur 4 blijkt dat straling volgens Penman-Monteith



voornamelijk in de zomer het belangrijkste is maar dat dit niet geldt voor de winterperiode. Daarnaast laat Figuur 4 zien dat er in de zomer wel degelijk dagen zijn waarbij de aerodynamische term net zo belangrijk is als de stralingsterm.

De empirische relatie van Makkink, met daarin de constante 0,65, is gebaseerd op experimenten uit de jaren '70 en '80. Hierbij kan de vraag worden gesteld of deze empirische constante ook voor het huidige, en ook voor het toekomstige klimaat geldig is.

De Penman-Monteith referentieverdamping zoals voorgesteld door Allen et al., 1998 maakt gebruik van een vooraf vastgesteld albedo (0,23), gewashoogte (0,12 m) en gewasweerstand (70 s m^{-1}). In werkelijkheid is het albedo afhankelijk van eigenschappen van het aardoppervlak waarbij gewassoort slechts één van de factoren is, naast bijvoorbeeld het vochtgehalte, de hellingshoek en –richting. De gewasweerstand zal in werkelijkheid ook worden beïnvloed door het weer. Daarmee heeft de omrekening van de Penman-Monteith referentieverdamping naar een potentiële gewasverdamping door middel van een gewasfactor zijn beperkingen.



3 Inventarisatie

3.1 Algemeen

Er is een inventarisatie uitgevoerd bij verschillende meteorologische en mogelijk verdampingsgerelateerde instellingen (Tabel 1). Bij deze organisaties is geïnterviewd of zij Penman-Monteith referentieverdamping bepalen. Indien dat het geval is, is gevraagd welke data en methode zij daarvoor gebruiken. Daarnaast is de vraag gesteld welke methode(n) zij toepassen om te komen tot vlakdekkende verdampingsgegevens. Als laatste is ook de vraag gesteld welke aandachtspunten dienen te worden meegenomen bij het bepalen van Penman-Monteith referentieverdamping (bijv. onnauwkeurigheden, mogelijke extra waarnemingen).

Tabel 1. Geraadpleegde organisaties met daarbij vermeld de namen van de personen met wie is gesproken.

<i>Organisatie</i>	<i>Naam</i>
KNMI	Fred Bosveld Adri Buishand Raymond Sluiter
Meteo Consult	Mark Alblas Wim van den Berg
WeerOnline	Elger Niemendal
WeatherNews	info@wni.com
WaterWatch	Wim Bastiaanssen
NEO	Remko de Lange
EARS	Andries Rosema

In onderstaande subparagrafen zal een korte samenvatting worden gegeven van de resultaten van deze inventarisatie.

3.2 Samenvatting resultaten

3.2.1 KNMI

Het KNMI berekent op dit moment alleen de referentieverdamping volgens Makkink. Dit wordt gedaan op 32 locaties. De data om Makkink verdamping te berekenen komt van de in totaal 35 automatische weerstations waar een aantal standaard meteorologische waarnemingen worden verricht. De etmaalgemiddelde gegevens, evenals de berekende Makkink referentieverdamping, zijn gratis beschikbaar via de KNMI internet site (www.knmi.nl/klimatologie). Het KNMI berekent momenteel geen Penman-Monteith referentieverdamping. Het blijkt echter dat voor alle locaties waar op dit moment de Makkink verdamping wordt berekend ook de Penman-Monteith referentieverdamping kan worden bepaald (zie Hoofdstuk 4).

Het interpoleren van de verschillende meteorologische variabelen die het KNMI meet is op dit moment één van de speerpunten van het KNMI. Momenteel is er geen operationeel systeem dat vlakdekkende meteorologische variabelen levert. Het KNMI is bezig na te gaan welke ruimtelijke interpolatiemethode het beste is voor welke variabele. Hierbij wordt bij voorkeur een



methode gebruikt die gebruik kan maken van hulpinformatie (zoals een aantal vormen van Kriging). In het verleden is gebruik gemaakt van de zogenaamde splines methode waarbij de resulterende vlakdekkende informatie werd getoetst en eventueel aangepast aan de ervaringen van de meteorologen.

Aandachtspunten die door het KNMI werden aangegeven:

- Windsnelheid is een variabele die een zeer lokaal karakter heeft waardoor ruimtelijke interpolatie zeer lastig is. Daarnaast is de meetnauwkeurigheid ter plaatse ook onzeker aangezien geen enkele locatie echt obstakel vrij is.
- De windsnelheid is een variabele die gedurende de dag sterk kan variëren. De vraag is of de Penman-Monteith referentieverdamping per dag kan worden berekend met de daggemiddelde windsnelheid.
- Relatieve luchtvochtigheid. De meetnauwkeurigheid, met name in de ochtend, is een probleem. Bij een warme dag die volgt op een vochtige nacht blijft de relatieve luchtvochtigheid lang hoog en schiet dan ineens omlaag. Hiermee onderschat je de verdamping in de ochtend.
- Bedekkingsgraad. Fred Bosveld (KNMI) gaf aan dat het van belang is om na te gaan wat de gevoeligheid is van Penman-Monteith voor de bedekkingsgraad. Als blijkt dat deze variabele erg gevoelig is en dat daarnaast de huidige meetmethode (1 punt in de hemel) van de bedekkingsgraad niet voldoende nauwkeurig is dan ligt daar mogelijk een actiepoint voor het KNMI. Hierbij moet worden opgemerkt dat de methode om Penman-Monteith referentieverdamping te schatten, zoals die door Allen et al., 1998 wordt voorgesteld, geen gebruik maakt van de bedekkingsgraad.
- Temporele resolutie: Makkink wordt door het KNMI dagelijks bepaald waarbij etmaal gemiddelde meteorologische gegevens worden gebruikt. Bij de Penman-Monteith vergelijking speelt wind een belangrijke rol. Gezien het feit dat wind sterk variabel is gedurende de dag is het voor te stellen dat de Penman-Monteith referentieverdamping ook op een hogere temporele resolutie bepaald zou moeten worden.
- Indien je de Penman-Monteith verdamping wil bepalen voor een historische reeks zijn daar te weinig metingen voor of deze zijn inhomogeen.

3.2.2 *Meteo Consult*

Meteo Consult bepaalt naast de Makkink referentieverdamping ook de Penman-Monteith referentieverdamping (Figuur 5). Dit wordt berekend voor alle stations van het KNMI alsmede voor een aantal meetstations van Meteo Consult zelf. Meteo Consult beschikt over zeven stations waar globale straling wordt gemeten, deze bevinden zich voornamelijk langs de kust. In Figuur 5 is de globale ligging van de stralingsmeetstations aangegeven met een gele ster. Daarnaast heeft Meteo Consult ook een aantal windstations, voornamelijk aan de kust, waar ook de temperatuur en de vochtigheid wordt gemeten. Deze windmeetstations zijn vooral bedoeld voor waarschuwingen en voorspellingen ten aanzien van lokale watersportlocaties. Meteo Consult merkt op dat de gemeten wind in het geval van afluende wind sterk gehinderd kan zijn door bijvoorbeeld duinen. De temporele resolutie van al deze metingen is 10 minuten.

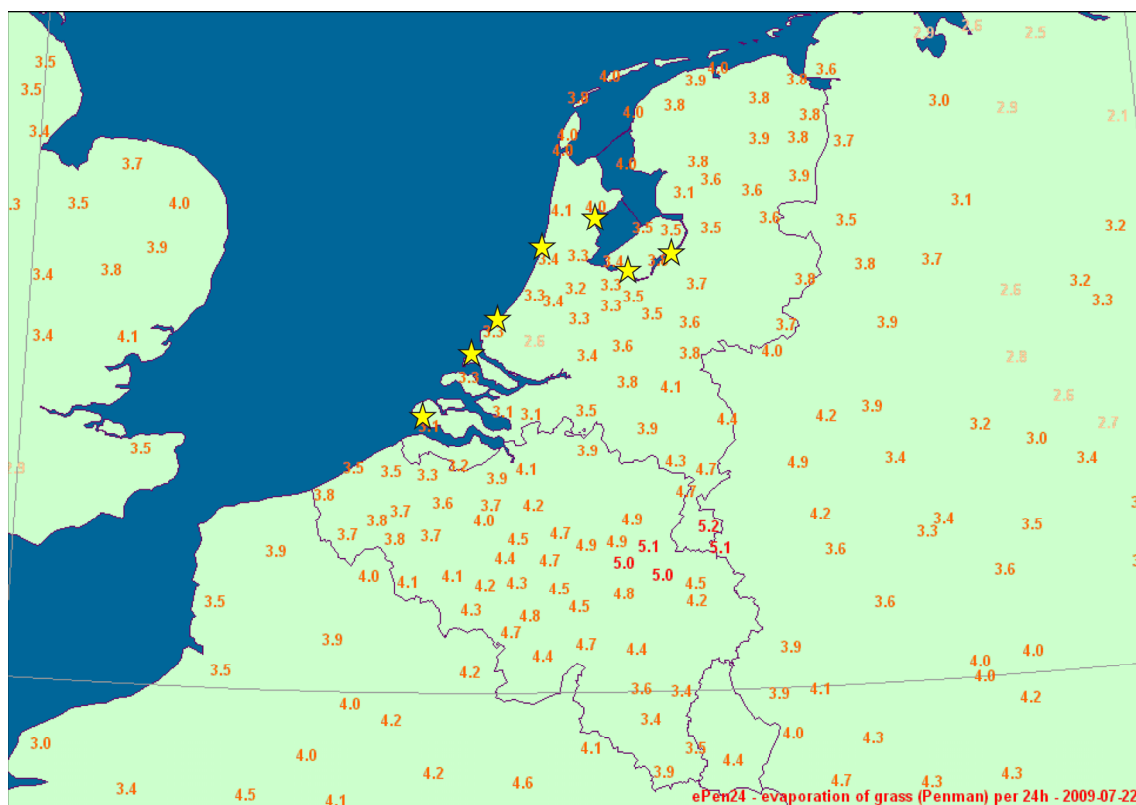
Daarnaast heeft Meteo Consult een netwerk van circa 250 meetpunten in het kader van gladheidbestrijding. De variabelen die op deze punten worden gemeten en van belang zijn voor Penman-Monteith, zijn de luchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid. Deze worden gemeten door meetpalen die in de berm naast het wegdek staan. De temporele resolutie van deze metingen is 5 minuten.



De meetgegevens van de gladheidsmeldsystemen en andere klantspecifieke weerstations zijn niet vrij beschikbaar.

Op dit moment wordt er door Meteo Consult geen ruimtelijke interpolatie uitgevoerd. Meteo Consult merkt op dat daarvoor op dit moment geen vraag is vanuit de markt maar dat kennis en ervaring daarmee aanwezig is bij de Duitse dochteronderneming.

Wat betreft aandachtspunten en mogelijke extra metingen werd door Meteo Consult aangegeven dat in het bijzonder het verschil tussen wind, temperatuur en straling langs de kust versus meer binnenland van belang is. Wat dat betreft zijn er nog wel enkele hiaten in het huidige meetnetwerk.



Figuur 5. Penman-Monteith referentie verdamping zoals deze wordt berekend door Meteo Consult. Voorbeeld voor 22 juli 2009. Met een gele ster is de globale ligging van de stralingsmeetpunten aangegeven. (Bron: Meteo Consult).

3.2.3 WeerOnline

WeerOnline bepaalt landsdekkend de Makkink referentieverdamping. De Penman-Monteith referentieverdamping wordt momenteel slechts voor een aantal specifieke klanten bepaald. WeerOnline beschikt niet over eigen meetstations maar maakt gebruik van een wereldwijd meetnetwerk. Voor Nederland bestaat dit meetnetwerk uit de 35 stations van het KNMI.

In Nederland maakt WeerOnline voorspellingen voor Makkink referentieverdamping op postcode niveau. De globale straling wordt daarbij berekend aan de hand van de extraterrestrische straling (afhankelijk van positie op aarde en tijd van het jaar, zie paragraaf 2.6.3) en de bedekkingsgraad zoals deze hetzij uit het weervoorspellingmodel komt (voor

toekomst voorspellingen) hetzij uit waarnemingen van het KNMI komt (voor historische reeksen).

Voor het bepalen van Makkink referentieverdamping op basis van (historische) waarnemingen wordt de globale straling berekend met behulp van KNMI metingen van de bedekkingsgraad.

Voor het bepalen Penman-Monteith referentieverdamping voor een aantal specifieke klanten wordt gebruikt gemaakt van KNMI metingen die het meest representatief zijn voor die specifieke locatie. Zo zal voor een plaats langs de kust gebruik worden gemaakt van een meetpunt langs de kust en niet van een meetpunt landinwaarts, ook al bevindt dit landinwaartse meetpunt zich op kortere afstand.

WeerOnline heeft geen aandachtspunten aangegeven.

3.2.4 *WeatherNews*

WeatherNews berekent geen Penman-Monteith verdamping. Sinds kort ligt de focus van deze instelling op scheepvaart en niet meer op het landoppervlak.

3.2.5 *WaterWatch*

WaterWatch bepaalt zowel de Penman-Monteith referentieverdamping als ook de potentiële- en actuele verdamping vlakdekkend (resolutie 35 m x 35 m) voor heel Nederland (www.waterwatch.nl/verdamping).

Figuur 6 geeft een voorbeeld van de referentieverdamping en actuele verdamping in heel Nederland voor 22 juli 2009. WaterWatch heeft zelf geen meetpunten maar maakt gebruik van metingen van het KNMI evenals data afkomstig van satellietbeelden. Daarnaast worden diverse algoritmen gebruikt om de meteorologische variabelen ruimtelijk te interpoleren.

WaterWatch gebruikt de volgende variabelen van de 35 automatische weerstations van het KNMI:

- Temperatuur
- Windsnelheid
- Relatieve luchtvochtigheid

Deze drie variabelen die nodig zijn voor de Penman-Monteith referentieverdamping worden vervolgens ruimtelijk geïnterpoleerd met behulp van de MeteoLook methode (zie paragraaf 5.7 voor meer detail). Voor het bepalen van het dampspanningstekort heeft WaterWatch een eigen methode ontwikkeld.

Voor het bepalen van de netto straling maakt WaterWatch geen gebruik van de 35 KNMI stations maar van de de MSG (Meteosat Second Generation; zie paragraaf 4.3 voor meer informatie). Aangezien de netto straling die het aardoppervlak bereikt ook wordt beïnvloed door eigenschappen van het landoppervlak, zoals bijvoorbeeld hellinghoek en hellingsrichting, worden de MSG data hiervoor gecorrigeerd door WaterWatch.

WaterWatch geeft aan dat het huidige aantal meetpunten (35) van het KNMI voldoende is. Een belangrijker aspect volgens WaterWatch is de meetnauwkeurigheid van de stations zelf. In het bijzonder het meten van de luchtvochtigheid is erg lastig.

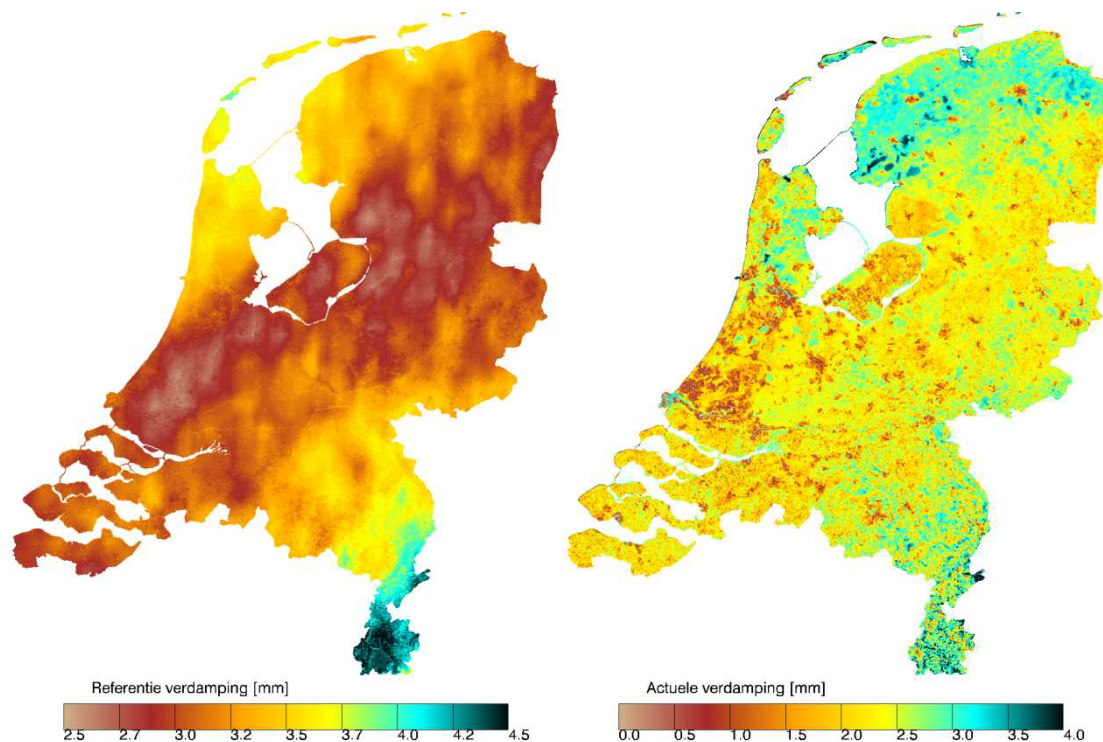
WaterWatch geeft verder aan dat de gewasfactoren-methode waarbij de referentieverdamping met een factor wordt vermenigvuldigd om zodoende tot een potentiële verdamping te komen



zijn beperkingen heeft (te ruw is). Bij het bepalen van de Penman-Monteith referentieverdamping zoals voorgesteld door Allen et al., 1998 wordt het albedo op 0,23 en de gewasweerstand op 70 s m^{-1} vastgezet. In werkelijkheid heeft ook de temperatuur evenals de zonnestraling een effect op de huidmondjes en daarmee op de gewasweerstand. Daarnaast is het albedo in werkelijkheid afhankelijk van het landoppervlak (landgebruik, helling, hellingshoek, actuele vochttoestand etc.). WaterWatch onderscheidt daarom liever de potentiële en actuele verdamping. De potentiële verdamping is daarbij gedefinieerd als de verdamping onder de heersende meteorologische omstandigheden waarbij het bodemvocht geen belemmering vormt voor verdamping.

Bij het berekenen van de potentiële verdamping wordt gebruik gemaakt van een aangepast Jarvis-Stewart model om de gewasweerstand te berekenen (Jarvis, 1976). Hiermee wordt de invloed van zonnestraling en temperatuur op de gewasweerstand berekend. Het werkelijke albedo wordt geschat uit satellietopnamen van het aardoppervlak.

Voor het bepalen van de actuele verdamping maakt WaterWatch gebruik van het zogenaamde Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Simpel gezegd wordt hierbij de energiebalans van het aardoppervlak opgelost waarbij de verdamping als restterm overblijft (Bastiaanssen et al., 2005). Hierbij wordt gebruik gemaakt van satellietdata die warmteopnamen van het aardoppervlak maken.



Figuur 6. Referentieverdamping volgens Penman-Monteith (links) en actuele verdamping volgens SEBAL (rechts) zoals deze worden berekend door WaterWatch. Voorbeeld voor 22 juli 2009. N.B. de kleurschaal verschilt per plaatje.

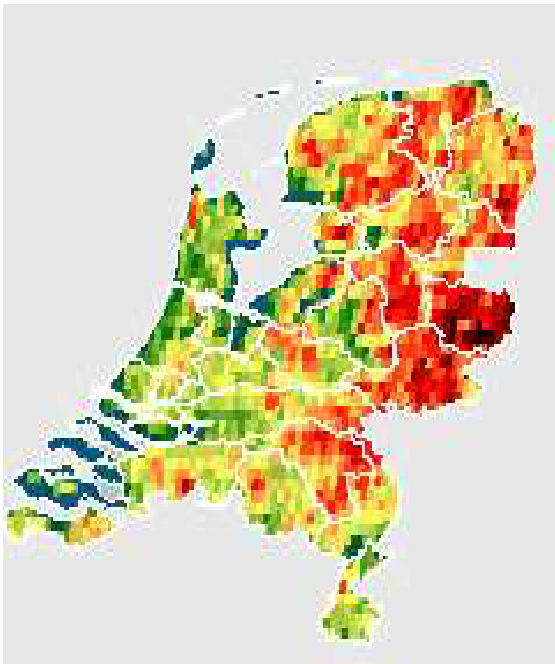
3.2.6 NEO

NEO levert geen producten die te maken hebben met verdampingsfluxen. Het bedrijf richt zich vooral op het schatten van bodemvocht uit radar remote sensing



3.2.7 EARS

EARS (Environmental Analysis and Remote Sensing) levert geen Penman-Monteith referentieverdamping maar levert producten over de actuele verdamping voor Europa en Afrika. De methode die daarbij gebruikt wordt is 'The Energy and Water Balance Monitoring System (EWBMS; Rosema et al., 2004)'. Figuur 7 geeft het resultaat van EWBMS voor de actuele verdamping van Nederland voor 2006. Hierbij wordt met behulp van satellietdata de energiebalans opgelost waarbij ook de invloed van fotosynthese op de voelbare warmtestroom wordt meegenomen (EARS en Hydrologic, 2007). EARS gaat ervan uit dat de potentiële verdamping gelijk is aan 0.8 maal de netto straling.



Figuur 7. Actuele verdamping gedurende 2006 voor Nederland volgens de EWBMS methode van EARS.



4 Beschikbare gegevens

4.1 Algemeen

Voor het berekenen van de referentieverdamping volgens de Penman-Monteith methode (zie paragraaf 2.6.9), moeten de volgende variabelen bekend zijn:

- Netto straling
 - Bij gebrek aan directe metingen is deze af te leiden uit:
 - Globale straling
 - Temperatuur
 - Relatieve luchtvochtigheid
- Temperatuur
- Windsnelheid
- Relatieve luchtvochtigheid

In de volgende paragraaf wordt beschreven welke van bovenstaande variabelen als puntmeting beschikbaar is en bij welke organisatie. In paragraaf 4.3 wordt ingegaan op vlakdekkende informatie ten behoeve van de Penman-Monteith verdamping. Tot slot wordt in paragraaf 4.4 een inschatting gegeven van de kosten van de data.

4.2 Puntdata

4.2.1 Algemeen

Het KNMI beschikt op dit moment (referentiedatum 1 september 2009) over 35 automatische weerstations, de zogenaamde AWS stations (Figuur 8). De meeste van deze stations bestaan sinds ongeveer 1990. Gedurende de periode 1990-2002 leverden deze stations uurlijkse meteorologische gegevens. Sinds 2002 is de temporele resolutie verhoogd naar 10 minuten. Voor 1990 beschikte het KNMI over zogenaamde termijnstations, een ander netwerk dan de huidige AWS stations, waar 3 uurlijkse waarden werden gemeten. Ook het huidige AWS netwerk is aan verandering onderhevig. Zo is kortgeleden (18 november 2008) het station Soesterberg opgeheven wat samenhangt met het feit dat de militaire vliegbasis Soesterberg is gesloten. Figuur 7 geeft aan waar de 35 automatische weerstations van het KNMI in Nederland liggen.

Sinds januari 2009 wordt de data die op de automatische weerstations wordt gemeten gratis beschikbaar gesteld via de website van het KNMI (<http://www.knmi.nl/klimatologie/metadata>). Hier is ook gedetailleerde informatie te vinden over de exacte locatie van de meetstations alsmede het landgebruik en de grondsoort.

4.2.2 Variabelen Penman-Monteith

In Figuur 7 is aangegeven welke van de benodigde variabelen voor de Penman-Monteith referentieverdamping waar worden gemeten. Met groen wordt aangeduid dat de variabele wel wordt gemeten, rood betekent dat de variabele niet wordt gemeten. Deze kaart is gebaseerd op het meetnetwerk zoals deze operationeel was op 1 september 2009. De data komt van de KNMI website (www.knmi.nl/klimatologie).



Momenteel berekent het KNMI voor alle stations waar globale straling en temperatuur wordt gemeten (32 stations op 1 september 2009: zie Figuur 7) de Makkink referentieverdamping. Met behulp van de methode zoals beschreven in hoofdstuk 2.6 kan voor al deze locaties ook de Penman-Monteith referentieverdamping worden berekend. Voor 1 locatie aan de kust (Wijk aan Zee) ontbreekt een windsnelheidsmeting maar deze wordt op zeer korte afstand (IJmuiden) van dit station bepaald en zou daarmee vervangen kunnen worden.

4.2.3 *Additionele windmetingen KNMI*

Naast het automatische netwerk heeft het KNMI nog een aantal andere locaties waar de windsnelheid wordt gemeten. Figuur 8 geeft de locaties van alle huidige windstations in Nederland. Als we deze figuur vergelijken met Figuur 7 blijkt dat voornamelijk in Zeeland mogelijk meer informatie beschikbaar is over windsnelheden. De meeste windmetingen worden door het KNMI gedaan op 10 m hoogte, volgens internationale richtlijnen. Er zijn echter een aantal stations die op een andere hoogte meten. Appendix 2 geeft aan welke stations afwijken van de standaardhoogte en op welke hoogte de wind gemeten wordt. Volgens het KNMI rapport 'Improving potential wind for extreme wind statistics' (Wever en Groen, 2009) zullen vanaf 1 september 2009 de gepubliceerde windsnelheden niet meer vertaald worden naar 10 m hoogte m.b.v. een correctie maar zullen de windsnelheden zoals deze daadwerkelijk zijn gemeten op die bepaalde hoogte worden gepubliceerd.

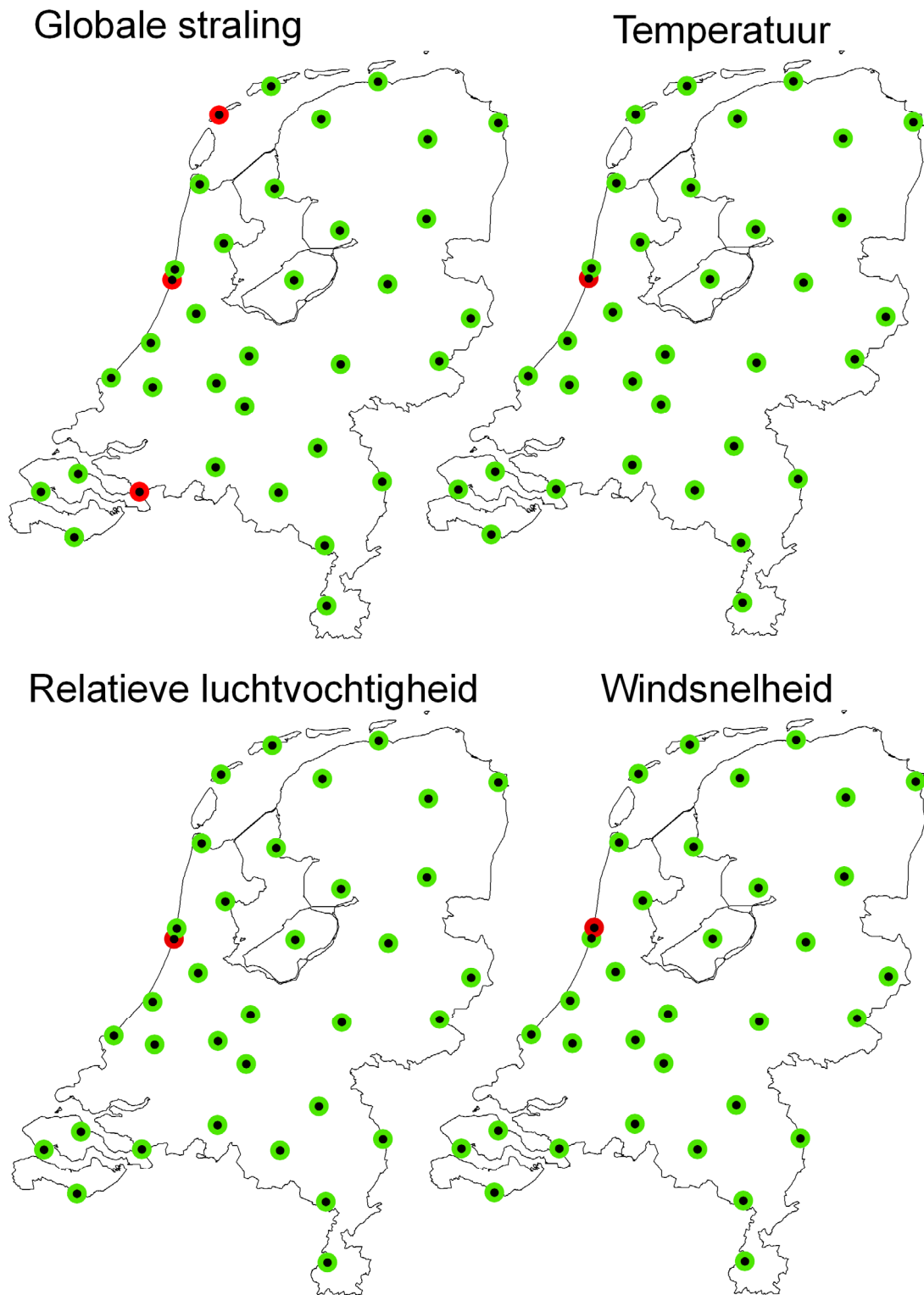
4.2.4 *Bedekkingsgraad*

De bedekkingsgraad is een variabele die eventueel gebruikt kan worden voor het berekenen van de netto straling. De bedekkingsgraad wordt uitgedrukt in octa's en geeft aan hoe bewolkt de hemel is (0=onbewolkt, 8=volledig bewolkt). In paragraaf 2.6.3 is aangegeven hoe netto straling (indirect) kan worden bepaald uit metingen van globale straling. Het is echter ook mogelijk om de netto straling (indirect) te berekenen aan de hand van enkel de bedekkingsgraad. Deze methode wordt gebruikt door het KNMI en WeerOnline.

Momenteel wordt door het KNMI op 24 van de 35 stations de bedekkingsgraad gemeten (Figuur 9: referentiedatum 1 september 2009). De manier waarop de bedekkingsgraad wordt gemeten is recent aan sterke veranderingen onderhevig geweest. Zowel de locaties als de kwaliteit van de metingen is hierdoor veranderd. Sinds circa 2000 is geen van de automatische weerstations meer bemand. In de tijd van bemande stations werd door een waarnemer de bedekkingsgraad van de gehele hemisfeer geschat. Tegenwoordig gebeurt dit door een scinometer. Deze meter kijkt recht omhoog en neemt dus als het ware een puntmeting en geen inschatting van de hemisfeer. Door deze scinometer zijn er meer metingen met extremen (wolkeloos of geheel bewolkt). Er loopt vanuit het KNMI in Cabauw nu een experiment om de bedekkingsgraad eventueel met een ander instrument te meten, de nubiscoop, welke wel de gehele hemisfeer meet. Dit experiment loopt op dit moment en duurt ongeveer een jaar. Na dat jaar zal geëvalueerd worden of dit instrument iets is om mee verder te gaan (mondelijke informatie Fred Bosveld, KNMI). Aangezien het KNMI voor het bepalen van de globale straling een (indirecte) methode hanteert die gebruik maakt van de bedekkingsgraad, komt het KNMI tot slechts 24 stations in plaats van 32 stations (paragraaf 4.2.2) waarvoor de Penman-Monteith referentieverdamping kan worden berekend (presentatie Jules Beersma, NHV dag actuele verdamping 17 sept. 2009).

Gezien het aantal stations met metingen van de bedekkingsgraad alsmede de kwaliteit van deze metingen wordt aanbevolen gebruik te maken van de metingen van globale straling.



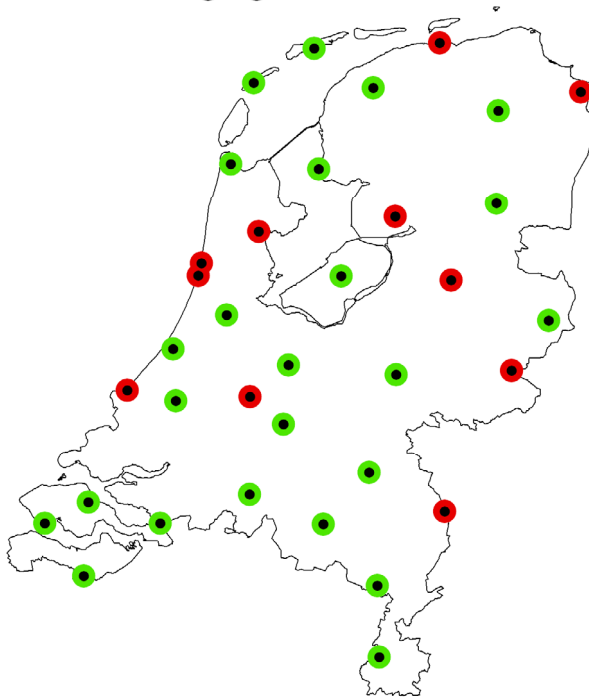


Figuur 8: Locaties van de automatische weerstations van het KNMI. Per benodigde variabele voor Penman-Monteith is aangegeven of deze wel (groen) of niet (rood) wordt gemeten. Referentiedatum: 1 september 2009, bron: www.knmi.nl/klimatologie.



Figuur 9. Locaties van de windstations, inclusief windpalen op zee en boorplatforms (Wever en Groen, 2009).

Bedekkingsgraad



Figuur 10. Locaties van de KNMI automatische weerstations waar wel (groen) en niet (rood) de bedekkingsgraad wordt gemeten. Referentiedatum: 1 september 2009.



4.2.5 *Meteo Consult netwerk*

In het kader van gladheidbestrijding wordt door Meteo Consult circa 250 punten de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid gemeten. Deze worden gemeten door meetpalen die in de berm naast het wegdek staan. De temporele resolutie van deze metingen is 5 minuten. De data is echter eigendom van de wegbeheerder en is daarom niet vrij beschikbaar.

4.3 Satelliet bronnen

Naast metingen van meteorologische variabelen is het ook mogelijk om gebruik te maken van satellietgegevens. Data afkomstig van satellietmetingen zijn bij uitstek geschikt indien de ruimtelijke verdeling van de gegevens gewenst is. Sommige satellieten meten direct meteorologische gegevens. Daarnaast zijn er ook satellieten die gegevens meten die een ruimtelijke inschatting geven van bijvoorbeeld het vegetatiepatroon. Dergelijke vlakdekkende informatie kan worden gebruikt om meteorologische puntmetingen ruimtelijk te interpoleren.

Een bekende satelliet voor meteorologische doeleinden is de Meteosat Second Generation (MSG). Sinds 2002 zijn beelden van de MSG beschikbaar. Deze beelden leveren een ruimtelijke beeld van de wolkentemperatuur en de bedekkingsgraad. De temporele resolutie van deze beelden is 15 minuten en de ruimtelijke resolutie is 1 km x 1 km (zichtbaar licht) en 3 km x 3 km (infrarood). Deze data wordt door WeerOnline, WaterWatch en EARS gebruikt bij het berekenen van de verdamping. Sinds kort zijn ook bewerkte beelden van MSG beschikbaar die de netto straling bepalen: <http://landsaf.meteo.pt>

In Tabel 2 zijn de namen van de meest relevante satellieten genoemd die bruikbaar zouden kunnen zijn bij het ruimtelijk interpoleren van de invoergegevens van de Penman-Monteith vergelijking, bijvoorbeeld met behulp van Kriging met een hulpvariabele. Hoewel dit rapport focust op de Penman-Monteith referentieverdamping is hierbij ook een doorkijk gemaakt naar het schatten van de potentiële en actuele verdamping. Bij de Penman-Monteith referentieverdamping wordt een standaardgewas aangenomen (hoogte 12 cm, gewasweerstand 70 s m^{-1}) terwijl dit in werkelijkheid uiteraard varieert, zowel in de tijd als in de ruimte. Dit wordt wel meegenomen in de volledige formule van Penman-Monteith. Welke satellieten voor welke variabele van de Penman-Monteith vergelijking gebruikt zouden kunnen worden is ook in deze tabel aangegeven. Daarnaast is de frequentie en de ruimtelijke resolutie van de beelden aangegeven. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de frequentie aangeeft wat de maximale temporele resolutie is. Omstandigheden (bewolking/storing) kunnen ervoor zorgen dat de operationele frequentie lager is. Tot slot is ook een indicatie van de kosten gegeven.

Een ruimtelijk beeld van het actuele bodemvochtgehalte is nodig voor het goed inschatten van de actuele verdamping en zou ook een hulpvariabele kunnen zijn bij het interpoleren van temperatuur. In Tabel 2 zijn echter geen satellieten opgenomen die een inschatting geven van het bodemvocht, zoals AMSR-E en ENVISAT. De reden hiervoor is dat het schatten van bodemvocht uit satellietbeelden nog niet erg nauwkeurig is. Passieve microgolven (AMSR-E) kunnen bijvoorbeeld wel een schatting geven van de bovenste 5 cm van het bodemvocht maar dit is niet hetzelfde als het bodemvocht dat voor planten beschikbaar is om te verdampen. Bij het ruimtelijk interpoleren van temperatuur zou het echter mogelijk wel geschikt kunnen zijn. Daarnaast kunnen deze beelden ook zorgen voor een verbetering van hydrologische modellen maar dit is met name in de onderzoeksfase.



Tabel 2. Informatie over satellieten die bruikbaar kunnen zijn voor de ruimtelijke interpolatie van Penman-Monteith verdamping.

Satelliet	Variabele	Frequentie	Ruimtelijke res.	kosten
MSG	netto straling	elke 15 minuten	1000 meter	gratis
Landsat	albedo oppervlakte- temperatuur ¹ NDVI ²	per 16-dagen	30 meter 60/120 meter	gratis/€ 1500 ³ gratis/€ 1500
MODIS	albedo oppervlakte- temperatuur NDVI	dagelijks	500 meter 1000 meter	gratis gratis
ASTER	albedo oppervlakte- temperatuur NDVI	per 16-dagen	30 meter 90 meter	50/300 dollar ⁴ 50/300 dollar
ResourceSat	Albedo NDVI	per 4-dagen	56 meter	€ 1700
DMC	Albedo NDVI	op aanvraag	32 meter	€0.121/km ²
SPOT 5	Albedo NDVI	op aanvraag	10 meter	€ 3300
Ikonos	Albedo NDVI	per 3/5-dagen	4 meter	variabel
QuickBird	Albedo NDVI	per 1/3-dagen	2,4 meter	variabel
GeoEye	Albedo NDVI	op aanvraag	1,65 meter	variabel
ASTER (GDEM)	hoogteligging ⁵	n.v.t.	30 meter	gratis
SRTM	hoogteligging	n.v.t.	90 meter	gratis

4.4 Inventarisatie van datakosten

De meeste meteorologische grondmetingen die van belang zijn voor het schatten van de Penman-Monteith referentieverdamping worden gedaan door het KNMI. Sinds januari 2009 zijn de metingen van het KNMI vrij beschikbaar via internet.

In de vorige paragrafen is aangegeven dat ook andere organisaties over metingen en/of methoden beschikken die van belang kunnen zijn voor het (regionaal) schatten van de Penman-

¹ Oppervlakte temperatuur is niet hetzelfde als luchttemperatuur

² NDVI is geen invoervariabele van Penman-Monteith maar zou gebruikt kunnen worden bij ruimtelijke interpolatie

³ Afhankelijk van welke Landsat (TM5 of ETM7), de €1500 is van toepassing indien het beeld wordt geleverd door Eurimage

⁴ Indien verzoek tot beeldopname wordt gedaan kost dit 300 dollar per beeld

⁵ Maaiveldshoogte is geen invoervariabele van Penman-Monteith maar zou gebruikt kunnen worden bij het ruimtelijk interpoleren van luchttemperatuur.



Monteith referentieverdamping. In deze paragraaf wordt per organisatie ingegaan op de eventuele kosten van de genoemde meetgegevens en/of methoden.

De kosten van de satellietgegevens die mogelijk gebruikt zouden kunnen worden bij het ruimtelijk interpoleren van Penman-Monteith referentieverdamping zijn gegeven in Tabel 2.

MeteoConsult

MeteoConsult geeft aan dat per meetpunt na moet worden gegaan of het mogelijk is of ook derden hiervan gebruik mogen maken. Een aantal punten zijn eigendom van bijvoorbeeld wegdekbeheerders. MeteoConsult geeft aan dat overleg hierover mogelijk is.

EARS

EARS geeft aan dat op dit moment de productie van de actuele verdampingsdata automatisch gebeurt per 10 dagen. Als near real time data nodig zijn kunnen ze dat ook dagelijks doen. Er zijn dan enkele dagen nodig om het systeem op te zetten. Daarna loopt het en moet het dagelijks even gecontroleerd worden. Data kunnen vervolgens worden aangeboden via een ftp site.

Bij een enkele gebruiker worden de kosten op ongeveer 1000 euro per maand geschat. De data mogen dan niet worden doorgegeven. Bij meer gebruikers kunnen de kosten per gebruiker omlaag. Bij 10 gebruikers bijvoorbeeld naar 200 euro per maand per gebruiker.

WaterWatch

De producten van WaterWatch zijn alleen via Basfood te verkrijgen. Het is mogelijk om gegevens voor een bepaald gebied aan te schaffen via MijnAkker.nl. Deze gegevens kunnen gedeeld worden met andere geïnteresseerden. Op MijnAkker.nl zijn twee standaard pakketten beschikbaar. Bij beide tekent de gebruiker zelf het gewenste gebied in en rekent af per hectare. Afwijkingen in samenstelling van pakketten en/of grote oppervlakten is bespreekbaar. MeteoLook is geen product wat los verkocht wordt.





5 Ruimtelijke interpolatiemethoden

5.1 Inleiding

De variabelen waarmee de PM referentieverdamping kan worden bepaald, worden op verschillende punten binnen Nederland gemeten (Figuur 7). Om van deze puntmetingen te komen tot een vlakdekkend beeld van de Penman-Monteith referentieverdamping binnen Nederland zal gebruik moeten worden gemaakt van een ruimtelijke interpolatiemethode. Diverse (internationale) wetenschappelijke studies zijn uitgevoerd naar verschillende interpolatiemethoden. Duidelijk is dat er niet direct één methode is die altijd te preferen is boven de andere methode. Voor elke variabele is wellicht een andere interpolatiemethode het beste. De beste interpolatietechniek kan zelfs voor één variabele nog verschillen afhankelijk van de tijdsspanne (uur- dag of maandgegevens). Factoren die van belang zijn in de overwegingen zijn (i) de beschikbare data, (ii) de benodigde nauwkeurigheid en (iii) de rekentijd.

5.2 Inventarisatie

Bij de organisaties welke benaderd zijn voor deze studie is de vraag gesteld of er gebruik wordt gemaakt van één of meerdere interpolatiemethoden. Uit deze inventarisatie blijkt dat er momenteel door geen enkele organisatie op operationele basis vlakdekkende informatie wordt gegenereerd met als uitzondering WaterWatch. Binnen WaterWatch wordt gebruik gemaakt van de zgn. 'MeteoLook' methode welke intern is ontwikkeld. Bij Meteo Consult werd aangegeven dat men wel over de mogelijkheden beschikt om een ruimtelijke interpolatie uit te voeren maar dat dit tot op heden nog niet wordt gedaan bij gebrek aan vraag vanuit de markt. Meteo Consult gaf echter wel aan voorkeur te hebben voor methoden die weinig rekentijd kosten, zoals splines.

Het KNMI heeft op dit moment als speerpunt het ruimtelijk interpoleren van diverse meteorologische gegevens en doet hier momenteel onderzoek naar (Sluiter, 2009 en Salet, 2009). Een drietal projecten zijn hiervan de aanleiding:

1. In het kader van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI) heeft de Waterdienst van Rijkswaterstaat het KNMI opdracht gegeven verschillende vergriddingsmethoden met elkaar te vergelijken. Hierover is het rapport 'Definitiestudie rasterdata meteorologie' verschenen (Buishand et al., 2008).
2. De Deutsche Wetterdienst voert momenteel een ca. 2 jarige studie uit naar het vergridden van meteorologische gegevens voor het Rijnstroomgebied. Het KNMI hiervoor nauw samen met de Deutsche Wetterdienst.
3. Eind 2010 wordt weer een decade afgesloten. KNMI maakt elke 10 jaar een nieuw overzicht van langjarige (30 jaar) gemiddelde meteorologische gegevens (KNMI, 2000). Hiervoor is het nodig ruimtelijke interpolatie uit te voeren. Tot nu toe was dit een eenvoudige interpolatietechniek (splines) waarbij de expertise van meteorologen gebruikt werd om locale aanpassingen te doen die niet noodzakelijkerwijs waren gebaseerd op de data. Figuur 1 is hiervan een voorbeeld. Gezien de huidige kennis en verbeterende computercapaciteit wil het KNMI voor de nieuwe klimaatatlas deze methode herzien.



In de volgende paragrafen worden kort een aantal interpolatietechnieken toegelicht die veelal worden gebruikt voor het interpoleren van meteorologische gegevens. Voor meer informatie wordt verwezen naar Cressie (1991), Isaaks en Srivastava (1989) en Sluiter (2009).

5.3 Thiessen methode

De Thiessen methode is internationaal beter bekend als de 'nearest neighbourhood' of Voronoï methode. Deze methode neemt voor elk punt waarvoor een voorspelling moet worden gemaakt, de waarde van het dichtsbijzijnde meetpunt. Hierdoor ontstaat een veld met zogenaamde Thiessen polygonen. Deze methode is erg snel en simpel maar geeft vaak onrealistische geïnterpoleerde velden. Deze methode werkt het beste bij een dicht netwerk van meetpunten.

5.4 Splines

De splines methode kan worden gezien als het fitten van een flexibel rubber oppervlak door een aantal bekende punten door middel van een wiskundige functie. Deze wiskundige functie is een x-orde polynoom. Splines is een exacte interpolator, wat betekent dat op de plaats van een meting deze meting exact wordt gereproduceerd. Het vlak tussen de meetpunten is vaak glad ('smooth' in internationale geostatistische literatuur). De splines methode is deterministisch, wat wil zeggen dat 'randomness' (toeval / willekeur) niet wordt meegenomen. Het resultaat is slechts één oppervlak dat is gebaseerd op de geometrische karakteristieken van de puntmetingen. De mogelijke fout tussen meetpunten wordt dus niet gekarakteriseerd.

Het voordeel van splines is dat de rekentijd zeer beperkt is. Het nadeel van splines is dat de methode erg gevoelig is voor uitschieters in de data (die mogelijk foutief zijn) en een zeer 'gladde' oppervlakte genereert. Splines wordt daarom over het algemeen geschikt geacht voor het interpoleren van maandelijks en jaarlijkse data (data met weinig variatie) maar niet voor dagelijkse of uurlijkse data. In Portugal is de methode splines vergeleken met verschillende andere interpolatietechnieken voor het interpoleren van gemiddelde maandelijks temperatuur. Hieruit bleek dat splines het slechter deed dan Kriging, lineaire regressie en inverse distance weighting (Tveito et al., 2006)

5.5 Inverse Distance Weighting

Inverse Distance Weighting (IDW) is gebaseerd op de aanname dat de dichtsbijzijnde waarneming meer bijdraagt aan de geïnterpoleerde waarde dan afgelegen waarnemingen. Oftewel, de invloed van een waarneming is invers gerelateerd aan de afstand tot een onbekende locatie waarvoor een schatting wordt gemaakt. Net als splines is IDW een deterministische methode en is het een exacte interpolator. Het voordeel van IDW is dat de methode intuïtief is (in tegenstelling tot splines). Evenals splines is IDW gevoelig voor uitschieters in de data. Deze interpolatiemethode werkt het best voor data die gelijk verdeeld is over het oppervlak (geen geclusterde data).

5.6 Kriging

Kriging geeft net als IDW meer gewicht (invloed) aan dichtbij gelegen meetpunten voor het interpoleren van waarden voor onbekende locaties. Het grote verschil echter met IDW is dat



Kriging geen deterministische methode is maar probabilistische methode. Kriging gaat wel uit van 'randomness' (toeval/ willekeur). Het resultaat hiervan is dat Kriging een geïnterpoleerd veld geeft van de beste schatting en tevens ook aangeeft hoe zeker deze schatting is. Dit laatste wordt ook wel de Kriging variantie genoemd. Deze Kriging variantie is groter op plaatsen waar weinig observatiepunten zijn.

Een noodzakelijke stap binnen Kriging is het maken van het variogram. Dit geeft aan hoe de waarnemingen met elkaar zijn gecorreleerd als functie van hun onderlinge afstand. Voor het goed schatten van een variogram zijn voldoende data nodig. Daarnaast is voor het maken van een goed variogram een ruimtelijk ongelijk verdeeld meetnetwerk gewenst waarmee verschillende onderlinge afstanden kunnen worden gedefinieerd (Schuurmans et al., 2007). Om uiteindelijk bij het ruimtelijk interpoleren tot een veld te komen dat betrouwbaar is (oftwel een kleine Kriging variantie), is het van belang dat nabij elke locatie waarvoor een voorspelling moet worden gedaan een meetpunt aanwezig is. Bij het toepassen van Kriging is enige geostatistische kennis van de gebruiker noodzakelijk. Kriging heeft meer rekentijd nodig dan empirische methoden.

5.6.1 *Simple Kriging*

Bij Simple Kriging wordt ervan uitgegaan dat de gemiddelde waarde van de variabele bekend is. Deze wordt berekend uit alle beschikbare waarnemingen of kan worden opgelegd. De aanname dat het gemiddelde bekend is wordt vaak als niet realistisch beschouwd. Simple Kriging wordt echter wel toegepast om te onderzoeken in hoeverre waarnemingen afwijken van een bekende (opgelegde) trend.

5.6.2 *Ordinary Kriging*

Bij Ordinary Kriging wordt ervan uitgegaan dat de gemiddelde waarde van de variabele onbekend is. Het gemiddelde wordt impliciet geschat waarmee rekeningen wordt gehouden met de onzekerheid van het gemiddelde.

5.6.3 *Kriging met hulpvariabelen*

Het is mogelijk om binnen Kriging gebruik te maken van externe (secundaire) variabelen die mogelijk de schatting van de doelvariabele kunnen verbeteren. Hierbij moet gedacht worden aan bijvoorbeeld het interpoleren van neerslag uit puntwaarnemingen waarbij de hoogte wordt meegenomen (Goovaerts, 2000) of de vlakdekkende informatie van de regenradar (Schuurmans et al., 2007). Andere voorbeelden zijn het meenemen van hoogte, of afstand tot de zee bij het interpoleren van windsnelheden. Bekende vormen van Kriging waarbij secundaire variabelen worden meegenomen zijn 'Universal Kriging (= Kriging with External Drift)', waarbij een trend wordt opgegeven voor het beschrijven van het Kriging gemiddelde of 'Colocated Cokriging' (Goovaerts, 1997). De meenemen van hulpvariabelen heeft over het algemeen een toegevoegde waarde indien er een goede correlatie is tussen de doelvariabele en de hulpvariabele (Schuurmans et al., 2007).

Welke hulpvariabelen meegenomen dienen te worden hangt dus af van de doelvariabele en is iets dat verder onderzoek vereist. Het KNMI is momenteel met zo'n onderzoek bezig voor een aantal meteorologische variabelen (Sluiter, 2009). Dit onderzoek is echter net van start gegaan en concrete resultaten zijn nog niet beschikbaar.

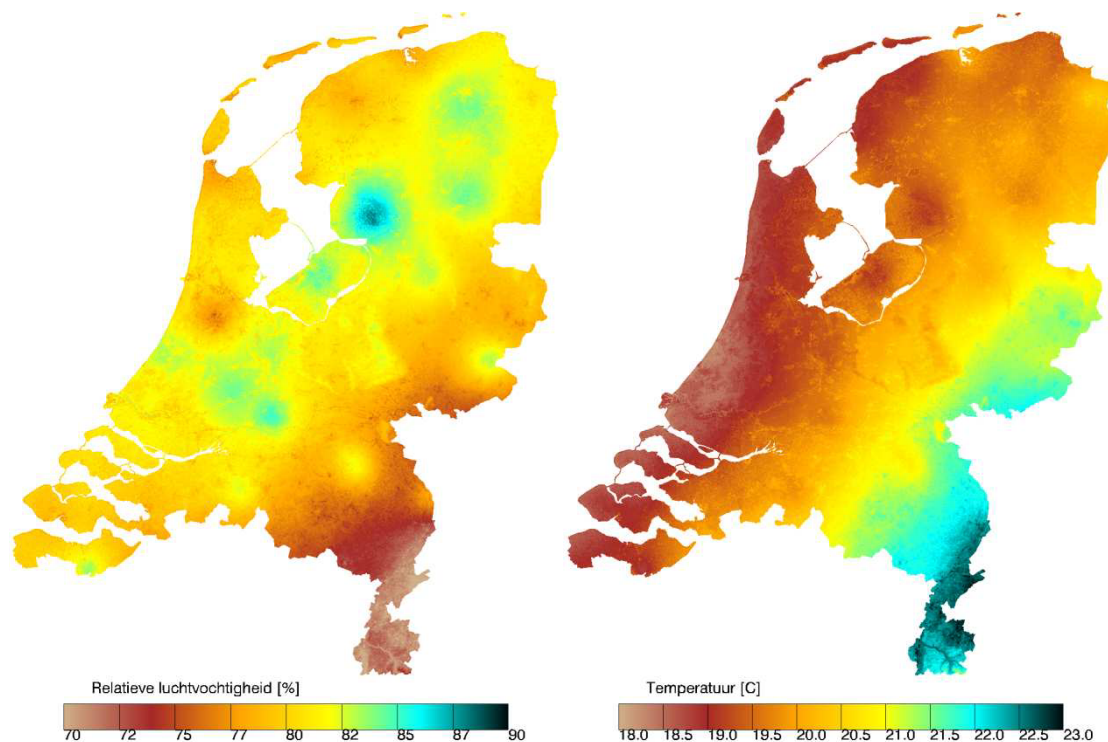


Satellietbeelden zijn bij uitstek geschikt om te dienen als hulpvariabele vanwege het feit dat satellietbeelden vlakdekkende informatie geven. In Tabel 2 zijn een aantal satellietbronnen gegeven die voor de verschillende variabelen van de Penman-Monteith invoergegevens een hulpbron kunnen zijn.

5.7 MeteoLook

WaterWatch maakt gebruik van de methode MeteoLook om de variabelen wind, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid ruimtelijk te interpoleren. MeteoLook is een fysisch gebaseerd regionaal distributiemodel (Voogt, 2007 en www.waterwatch.nl/tools0/meteolook.html). MeteoLook maakt onder andere gebruik van de zogenaamde Monin-Obukhov theorie. Deze theorie beschrijft de flux-profiel relaties van wind, temperatuur, vochtigheid en latente warmtestroom (Monin en Obukhov, 1954). Daarnaast wordt ook gebruik gemaakt van relaties als bijvoorbeeld afstand tot de zee en hoogte.

In Figuur 10 is een voorbeeld gegeven van de uitkomst van MeteoLook voor de relatieve luchtvochtigheid (links) en de temperatuur (rechts) op 22 juli 2009. Deze vlakdekkende informatie wordt gebruikt voor het vlakdekkend berekenen van de referentie-, potentiële- en actuele verdamping (Figuur 6).



Figuur 11. Relatieve luchtvochtigheid (links) en temperatuur (rechts) vlakdekkend voor heel Nederland berekend m.b.v. MeteoLook. Voorbeeld voor 22 juli 2009. (Bron: WaterWatch).



6 Conclusies en Aanbevelingen

6.1 Conclusies

De referentieverdamping wordt door hydrologen bijna altijd gebruikt voor het bepalen van de actuele verdamping. Een verbeterde referentieverdamping dient als eerste stap richting het beter bepalen (modelleren) van de actuele verdamping. Bij Makkink, de huidige standaard, wordt ervan uitgegaan dat alleen de straling bepalend is voor de referentieverdamping. Penman-Monteith, de internationale standaard, bevat ook een aerodynamische term.

Uit deze studie blijkt dat het mogelijk is om de referentieverdamping volgens Penman-Monteith zoals voorgesteld door Allen et al, 1998 op alle KNMI stations te bepalen waar momenteel de Makkink referentieverdamping wordt bepaald. Door het KNMI wordt echter alleen de Makkink referentieverdamping berekend.

Uit de inventarisatie onder weegerelateerde organisaties blijkt dat alleen Meteo Consult, WeerOnline en WaterWatch de referentieverdamping volgens Penman-Monteith bepalen. Van deze organisaties is WaterWatch de enige die de referentieverdamping vlakdekkend (met een resolutie van 35 m x 35 m) bepaald.

Uit deze studie kwam naar voren dat de meeste organisaties gebruik maken van het automatische netwerk van het KNMI met 35 stations. Daarnaast heeft het KNMI nog een aantal andere meetstations voor wind. Alle dagelijkse waarnemingen van het KNMI zijn sinds 1 januari 2009 vrij beschikbaar via internet. Meteo Consult en WeerOnline beschikken over een aantal andere meetlocaties. Meteo Consult heeft momenteel 7 punten waar globale straling wordt gemeten en enkele windstations. Zowel Meteo Consult als WeerOnline hebben beschikking over een uitgebreid netwerk ten behoeve van gladheidbestrijding. Op deze punten wordt onder andere de luchttemperatuur alsmede relatieve luchtvochtigheid gemeten. Deze data zou kunnen worden gebruikt voor het beter schatten van de ruimtelijke verdeling van Penman-Monteith variabelen.

Alle variabelen, met uitzondering van de netto straling, die nodig zijn voor het berekenen van de Penman-Monteith referentieverdamping worden momenteel (1 september 2009) door het KNMI direct gemeten op 35 automatische weerstations. Aangezien de netto straling nergens (met uitzondering van 1 experimentele opstelling van het KNMI in Cabauw) wordt gemeten kan de netto straling alleen indirect worden bepaald. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar. Indien gebruik wordt gemaakt van de internationale standaard FAO 56 (Allen et al., 1998) wordt de netto straling berekend aan de hand van de gemeten globale straling, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. In dat geval kan in Nederland op alle stations waar momenteel de Makkink referentieverdamping wordt bepaald ook de Penman-Monteith referentieverdamping worden bepaald. Dit zijn momenteel 32 stations omdat daar de globale straling wordt gemeten. Indien gebruik wordt gemaakt van de gemeten bedekkingsgraad voor het bepalen van de globale straling kan in Nederland slechts op 24 stations de Penman-Monteith referentieverdamping worden bepaald. Gezien het geringe aantal stations waar de bedekkingsgraad wordt gemeten alsmede de kwaliteit van deze metingen wordt aanbevolen gebruik te maken van de metingen van globale straling, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid voor het (indirect) bepalen van de netto straling.



Uit de inventarisatie kwam naar voren dat voornamelijk de nauwkeurigheid van de luchtvochtigheidsmetingen te wensen over laat (opgemerkt door het KNMI en WaterWatch). Daarnaast geeft het KNMI aan dat de metingen van bedekkingsgraad geëvalueerd worden op hun nauwkeurigheid. Over de vraag of de huidige hoeveelheid data voldoende is verschillen de meningen. Volgens WaterWatch is het huidige netwerk van 35 stations voldoende. Meteo Consult zou graag meer meetpunten zien in het bijzonder voor het bepalen van verschillen tussen kust en landinwaarts gelegen gebieden.

Van alle benaderde organisaties heeft alleen WaterWatch momenteel een operationele methode om meteorologische variabelen ruimtelijk te interpoleren. Deze methode is echter niet beschikbaar. Voor het KNMI is de ruimtelijke interpolatie van de verschillende meteorologische variabelen een speerpunt maar dit is tot op heden geen operationeel product. Indien er een methode is ontwikkeld zal deze vrij beschikbaar zijn.

Gezien het feit dat veel van de Penman-Monteith variabelen beïnvloed worden door het landoppervlak zal een 'rechteo-rechteaan' interpolatiemethode niet toereikend zijn. Hiermee vallen methoden als inverse distance, splines en ordinary Kriging af. Om de variabelen ruimtelijk te kunnen interpoleren zal gebruik moeten worden gemaakt van een interpolatiemethode die één of meerdere hulpvariabelen gebruikt (zoals Kriging met external drift, colocated cokriging). Hulpvariabelen waaraan gedacht kan worden zijn DEM's (hoogte modellen) en (actuele) landgebruikkaarten. In dit rapport zijn een aantal satellieten beschreven die als hulpbron kunnen dienen bij de ruimtelijke interpolatie. Een andere mogelijkheid is een methode die gebruik maakt van meteorologische flux-relaties, zoals MeteoLook.

6.2 Aanbevelingen

Hieronder zijn de aanbevelingen gegeven om uiteindelijk te komen tot een betere ruimtelijke inschatting van de actuele verdamping. Deze aanbevelingen komen voort uit deze studie en richten zich op de regionalisatie van de Penman-Monteith verdamping. Voor een uitgebreider overzicht van aanbevelingen wordt verwezen naar het STOWA rapport 2009-11 (Droogers, 2009).

Korte termijn

- Publicatie van zowel Makkink referentieverdamping als Penman-Monteith referentie verdamping met de methode zoals aangegeven door FAO 56 (Allen et al., 1998)
- Publiceren gewasfactoren voor Penman-Monteith (literatuur studie)
- Studie naar bepaling van netto straling uit huidige meetgegevens
- Meten van netto straling op de KNMI automatische weerstations

Lange termijn

- Direct bepalen Penman-Monteith potentiële verdamping
- Eén verantwoordelijke organisatie voor verzamelen en beschikbaar stellen van verdampingsgegevens binnen de hydrologische gemeenschap
- Vergelijking van interpolatiemethoden waarbij ook, hoewel niet beschikbaar, MeteoLook wordt meegenomen.



7 Referenties

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, 1998. ISBN 92-5-104219-5.
- Cressie N., 1991. Statistics for Spatial Data, New York, Wiley.
- Bastiaanssen, W. G. M., E. J. M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B. P. Thoreson and R. G. Allen, 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve waterresources management under actual field conditions. J. Irrig. Drain. E-ASCE. 131: pp. 85-93.
- Buishand, T.A., C.A. Velds, 1980. Neerslag en Verdamping. KNMI.
- Buishand, T.A., J.J. Beersma, R. Sluiter en T. Kroon, 2008. Definitiestudie rasterdata meteorologie. De Bilt, KNMI / RWS Waterdienst, 2008
- De Bruin, 1981. The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data. Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague. Proc. And Inf. 28: 25-37.
- De Bruin, 1988. Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze vor de klimatologische verdampingsgetallen. Technische rapport KNMI: TR-111.
- De Bruin, 1996. Micrometeorologie. Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep meteorologie, dictaat 06252207.
- Dirksen, C., 1985. Relationship between root uptake-weighted mean soil water salinity and total leaf water potentials of alfalfa. Irrigation Science, 6 (1), 39-50.
- Dirksen, C. and Augustijn, D.C., 1988. Root water uptake function for non-uniform pressure and osmotic potentials. Agronomy Abstracts, Annual Meetings of American Society of Agronomy ASA, 182.
- Dirksen, C., Kool, J.B., Koorevaar, P., et al., 1993. HYSWASOR: simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: Russo, D. And Dagan, G. eds. Water flow and solute transport in soils: development and applications. Springer-Verlag, Berlin, 99-122. Advanced Series in Agricultural Sciences no. 20.
- EARS en Hydrologic, 2007. Monitoring and forecasting precipitation evaporation and water budget using satellite and radar information. Project RGI-203.
- Droogers, P., 2009. Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer: definitiestudie. FutureWater rapport nr 82. STOWA rapport 2009-11. ISBN: 978.90.5773.428.1
- Droogers, P. and R.G. Allen, 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions, Irrigation and Drainage Systems 16, pp. 33–45.
- Feddes, R.A., G. H. de Rooij, J.C. van Dam, 2004. Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges and Applications. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands
- Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. Comm. Hydrol. Res. TNO, The Hague, Proc. And Inf. 39, pp. 33-44.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. J. Hydrol., 228, pp. 113-129.
- Isaaks, E. H. en R. M. Srivastava, 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press.
- Jacobs, A.F.G. en H.A.R. De Bruin, 1998. Makkink's equation for evapotranspiration applied to unstressed maize. Hydrol. Process. 12, pp. 1063-1066.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter, Jr. and R.J. Reginato, 1985. Net radiation calculated from remote multispectral and ground station meteorological data. Agric. For. Meteorol. 35, pp. 153–164.



- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical Transaction of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. Vol.273, no. 927, pp. 593-610.
- KNMI, 2000. Klimaatatlas van Nederland
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. Jour. Inst. Of Water Eng., 11: 277-288.
- Monin, A. S. and A. M. Obukhov, 1954. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. T. Geophys. Inst. of the Soviet Acad. Scie., S.S.S.R., 24, pp. 163-187.
- NHV, 2002. Hydrologische woordenlijst. Nederlandse Hydrologische Vereniging, Utrecht
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972. On the assessment of the surfaces heat flux and evaporation using large scale parameters. Month. Weath. Rev., 100: 81-92.
- Rijtema, P.E., 1965. An analyses of actual evapotranspiration. Agric. Res. Rep. 659. Pudoc, Wageningen, 107 pp.
- Rosema, A., Verhees, L., Sun, S., Fu, R., Li, F., Zhao, Z., Wu, R., Hu, L., You, R., Zhang, Y.Y., Wang, N., Yang, X., Jiang, D., Liu, H.H., Ma, Z., De Bruin, H., Bink, B., and Wu, X., 2004. China Energy and Water Balance Monitoring System. Scientific final report. Oret-Miliev project 98/53, commissioned by the State Forestry Administration.
- Salet, F.W.J., 2009. Het interpoleren van temperatuurgegevens: Verslag van een onderzoekstage bij het KNMI.
- Schuermans, J. M, M. F. P. Bierkens, E. J. Pebesma en R. Uijlenhoet, 2007. Automatic prediction of high-resolution daily rainfallfields for multiple extents: the potential of operational radar. J. Hydrometeor. 8, pp. 1204-1224.
- Sluiter, R., 2009. Interpolation methods for climate data: Literature review. KNMI, Intern rapport IR 2009-04.
- Tveito, O.E., M. Wegehenkel, F. Van der Wel & H. Dobesch (2006). The Use of Geographic Information Systems in Climatology and Meteorology - Final Report COST Action 719.
- Van Genuchten, M.T., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. USDA-ARS, US Salinity Laboratory, Riverside. Research Report no. 121.
- Voogt, M. P., 2007. Meteolook: a physically based regional distribution model for measured meteorological variables. M.Sc. thesis, Delft University of Technology.
- Wever, N en G. Groen, 2009. Improving potential wind for extreme wind statistics. KNMI, Scientific report WR 2009-02.
- Winter, T. C., D. O. Rosenberry & A. M. Sturrock, 1995. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the North Central United States. Water Resour. Res. 31 (4), pp. 983-993.

Websites:

www.knmi.nl/klimatologie/

<http://www.knmi.nl/klimatologie/metadata>

<http://landsaf.meteo.pt/>

www.waterwatch.nl/verdamping

www.waterwatch.nl/tools0/meteolook.html

http://www.idsw.nl/standaarden/woordenboek/aquo-lex_-_begrippen/



Appendix 1: Albedo waarden

Onderstaande Tabel geeft een globale inschatting van albedo waarden voor verschillende landoppervlakken (De Bruin, 1996)

<i>Gewas/oppervlak</i>	<i>Specificatie</i>	<i>Albedo (-)</i>	
Onbebouwd bouwland	Kleigrond	0,16-0,23	
	Grijs zand droog	0,25	
	Grijs zand vochtig	0,18	
	Zwart droog	0,13	
	Zwart vochtig	0,08	
	Geploegd droog	0,20-0,25	
	Donkere ruwe humus	0,05-0,10	
	Fijn licht zand	0,37	
	Rivierzand	0,43	
	Nat zand	0,09	
	Gewassen	Groen gras	0,26
		Droog gras	0,15-0,25
Mais		0,16-0,23	
Winterrogge		0,21	
Zomerrogge		0,15-0,18	
Tarwe		0,10-0,25	
Gerst		0,26	
Gerst rijp		0,30	
Gerst stoppel		0,34	
Aardappelen		0,15-0,25	
Sla		0,22	
Suikerbieten		0,18-0,25	
Bos	Naaldbossen	0,10-0,14	
	Loofbossen	0,10-0,19	
Heide		0,10	
Riet		0,18-0,21	
Woestijn		0,20-0,45	
Sneeuw	Vers	0,82-0,99	
	Oud	0,40-0,50	



Appendix 2: Windstations met afwijkende hoogte

Tabel 3: Lijst met stations waar windmetingen plaatsvinden die afwijkend zijn van de standaardhoogte van 10 m. (Wever en Groen, 2009). Voor de ligging van de stations zie Figuur 8.

station number	station name	sensor height (m)	corrected since	corrected till	factor U_{mean}	factor U_{max}
225	Ijmuiden	18.5	19940111	19950711	1.025	1.025
225	Ijmuiden	18.5	19950712	now	1.070	1.060
239	F3-FB-1	59.2	19940111	19950711	1.260	1.260
239	F3-FB-1	59.2	19950712	now	1.200	1.160
252	K13	73.8	19940111	19950711	1.298	1.298
252	K13	73.8	19950712	now	1.230	1.180
253	AUK-ALPHA	103.3	19940111	19950711	1.355	1.355
253	AUK-ALPHA	103.3	19950712	now	1.270	1.210
254	Meetpost Noordwijk	27.6	19940111	19950711	1.142	1.142
254	Meetpost Noordwijk	27.6	19950712	now	1.120	1.090
255	North Cormorant	101.3	19940111	19950711	1.355	1.355
255	North Cormorant	101.3	19950712	now	1.270	1.210
260	De Bilt	20.0	19960503	now	1.079	1.063
270	Leeuwarden	6.0	19710423	19711207	0.890	1.000
285	Huibertgat	18.0	19950712	now	1.070	1.050
308	Cadzand	17.0	19960503	now	1.060	1.050
310	Vlissingen	27.0	19971002	now	1.079	1.063
311	Hoofdplaat	16.5	19970201	now	1.060	1.045
312	Oosterschelde	16.5	19960503	now	1.060	1.045
313	Vlakte v.d. Raan	16.5	19970201	now	1.060	1.045
315	Hansweert	16.0	19960503	now	1.055	1.040
316	Schaar	16.5	19960503	now	1.060	1.045
320	Lichteiland Goeree	38.3	19940111	19950711	1.120	1.120
320	Lichteiland Goeree	38.3	19950712	now	1.150	1.120
321	Europlatform	29.1	19940111	19950711	1.148	1.148
321	Europlatform	29.1	19950712	now	1.120	1.100
324	Stavenisse	16.5	19971001	now	1.060	1.045
330	Hoek van Holland	15.0	19940111	19950711	1.055	1.055
330	Hoek van Holland	15.0	19950712	now	1.045	1.040
331	Tholen	16.5	19960503	now	1.060	1.045

