

Verbetering bepaling actuele  
verdamping voor het strategisch  
waterbeheer: definitiestudie





# Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer: definitiestudie

maart 2009

**Auteur**

P. Droogers

**Opdrachtgever**

STOWA

**Begeleidingscommissie**

J. den Besten

G. van den Eertwegh

H. van Hardeveld

J. Heijkers

H. Niewold

M. Talsma

**Report FutureWater: 82**



**FutureWater**

Costerweg 1G  
6702 AA Wageningen  
The Netherlands

+31 (0)317 460050

[info@futurewater.nl](mailto:info@futurewater.nl)

[www.futurewater.nl](http://www.futurewater.nl)

# Ten Geleide

Verdamping is voor de meeste gebieden in Nederland, na neerslag, de belangrijkste term van de waterbalans. Recentelijk is de aandacht voor het nauwkeurig bepalen van de verdamping toegenomen, omdat onderwerpen als droogte, grondwateraanvulling, klimaatverandering, afvoer, vasthouden en bergen voor een belangrijk deel worden bepaald door de verdamping. Belangrijke aspecten zijn hierbij de methode van potentiële verdamping bepaling, beschikbaarheid van metingen en het toepassen in hydrologische modellen.

STOWA heeft opdracht gegeven aan FutureWater om gezamenlijk met een begeleidingscommissie vanuit vier waterschappen een definitiestudie uit te voeren, met als doel het verbeteren van de schatting van de actuele verdamping in ruimte en tijd voor toepassingen in het regionale waterbeheer.

Deze definitiestudie heeft geleid tot een concreet aantal aanbevelingen voor de korte en de lange termijn zoals beschreven in dit rapport. Daarnaast zullen een aantal vervolgstappen worden genomen, gericht op informatie verstrekking en draagvlak vergroting, met als uiteindelijke doel dat regionale waterbeheerders verdamping nauwkeuriger kunnen bepalen ter ondersteuning van beheer en beleid.



# Samenvatting

Verdamping is, na neerslag, voor de meeste gebieden in Nederland de grootste component van de waterbalans. Het is voor waterbeheerders daarom van belang om de actuele verdamping zo goed mogelijk vast te stellen, voor zowel beleidsmatige als operationele beslissingen. Er bestaat echter geen gestandaardiseerde aanpak bij regionale waterbeheerders om de actuele verdamping te schatten. Diverse methoden worden gebruikt en de nauwkeurigheid is vaak laag en de nauwkeurigheid zelf is bijna altijd onbekend. De STOWA heeft daarom een project gestart 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.”**

In dit rapport is dit verder uitgewerkt waarbij deze hoofddoelstelling is verfijnd tot drie deelonderwerpen: (i) aanbevelingen voor de korte termijn, (ii) aanbevelingen voor de lange termijn en (iii) inventarisatie metingen actuele verdamping.

Vaak wordt de term “verdamping” gebruikt zonder dat precies wordt gespecificeerd wat er wordt bedoeld. Het eerste onderscheid dat moet worden gemaakt is het verschil tussen actuele-, potentiële- en de referentie verdamping. Een ander belangrijk onderscheid waar de algemene term “verdamping” naar verwijst, is van welk oppervlak dit komt. De belangrijkste zijn: open-water, verhard (stedelijk) gebied, plant, kale grond en interceptie.

De inventarisatie van metingen naar actuele verdamping leverde 35 meetlocaties op. Het grootste gedeelte van deze metingen waren niet beschikbaar om op te nemen in een database, omdat ze te specifiek waren om verder te gebruiken of omdat de gegevens nog niet waren opgeschoond. Uiteindelijk zijn er voor zes locaties metingen beschikbaar variërend van één tot twintig jaar.

In Nederland is het gebruikelijk om de actuele verdamping te bepalen op basis van de referentie verdamping. Afhankelijk van de vochttoestand van de bodem kan hieruit dan de actuele verdamping worden bepaald. De referentie verdamping wordt sinds 1987 in Nederland standaard bepaald met behulp van de Makkink methode. Wereldwijd wordt echter vaak de Penman-Monteith methode gebruikt welke meer fysisch gebaseerd is dan de Makkink methode. De consensus in de wetenschappelijke literatuur is dat Penman-Monteith een betere schatting van de referentie verdamping geeft dan Makkink. Er wordt wel altijd op gewezen er Penman-Monteith meer metingen benodigd zijn dan voor Makkink.

Hydrologische modellen worden vaak ingezet om te analyseren wat het effect is van bepaalde maatregelen. Actuele verdamping is een belangrijke component van deze modellen, want water dat niet verdampt zal draineren en moeten worden afgevoerd. Daarnaast is het verschil tussen de potentiële verdamping en de actuele verdamping een maat voor het watertekort. Het SWAP model, en het afgeleide Meta-SWAP, is binnen Nederland het meest toegepaste model om de actuele verdamping te bepalen.

De invloed van klimaatverandering op actuele verdamping is nog niet volledig bekend. Het is duidelijk dat de referentie verdamping hoger zal worden met waarden van 4% tot 16% in de zomermaanden rond 2050. Voor de zomermaanden rond 2100 wordt zelfs uitgegaan van 7% tot 34%. Aangezien de actuele verdamping niet alleen een functie van de referentie verdamping



is, maar ook van de hoeveelheid beschikbaar vocht in de bodem, zijn hiervoor nog geen eensluitende schattingen. Dit houdt onder andere samen met de hoeveelheid water die in de toekomst aangevoerd kan worden. Verder vormt het verhoogde CO<sub>2</sub> effect nog een complexerende factor. Aan de ene kant kunnen planten hierdoor efficiënter omgaan met water, maar tegelijkertijd laat onderzoek zien dat indien er voldoende water beschikbaar is het verhoogde CO<sub>2</sub> kan leiden tot hogere groei en niet tot verminderde actuele verdamping.

Dit onderzoek heeft geleid tot een aantal aanbevelingen voor de korte en lange termijn om de actuele verdamping ten behoeve van het regionale waterbeheer te verbeteren. Deze aanbevelingen kunnen als volgt worden samengevat:

- **Verbeteren toepassing referentie verdamping.**  
Op korte termijn kan het gebruik van de referentie verdamping verbeterd worden. De referentie verdamping volgens Makkink wordt momenteel voor 20 locaties in Nederland door het KNMI bepaald. Er zou echter een brede discussie opgestart moeten worden om te evalueren of Makkink nog steeds de meest wenselijke methode is, of dat op Penman-Monteith moet worden overgestapt. Voor droogtestudies zou nu al Penman-Monteith kunnen worden gebruikt. Ook zou de referentie verdamping verder geregionaliseerd moeten worden, waarbij onderzocht moet worden in hoeverre de referentie methode gevoelig is voor afwijkingen tussen de lokale condities en de meetlocatie en hoe dit valt op te verbeteren. Dit laatste is een wat langere termijn aanbeveling en vereist nadere studie.
- **Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten.**  
Uit de inventarisatie is gebleken dat er veel metingen zijn uitgevoerd, maar dat slechts een klein gedeelte van deze metingen ook echt ontsloten zijn en direct in een database zijn opgenomen behorende bij dit rapport. Een gedeelte van deze metingen zou echter wel opgenomen kunnen worden, maar vereisen nadere kwaliteitscontrole inclusief het opvullen van ontbrekende dagen. Het is dan ook aan te bevelen om deze metingen op te schonen en te ontsluiten voor verder gebruik.
- **Operationeel meten actuele verdamping.**  
Er zou gekeken moeten worden of het mogelijk is om één instituut de verantwoordelijkheid te geven voor het operationeel meten en verspreiden van actuele verdamping gegevens aan regionale waterbeheerders. Een voorwaarde hierbij is dat dit dan op een hoge ruimtelijke resolutie zou moeten plaatsvinden, gezien de grote spreiding van de actuele verdamping als functie van bodem, gewas, neerslag, drooglegging etc. Op korte termijn kan dit verwezenlijkt worden door gebruik te maken van remote sensing. Op de langere termijn zouden daarnaast ook lysimeters kunnen worden ingezet.
- **Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren.**  
Het SWAP model wordt algemeen beschouwd als het standaard model voor het bepalen van de actuele verdamping. Voor wat betreft de bepaling van de interceptie verdamping is er echter onzekerheid over de nauwkeurigheid, de concepten en de invoergegevens die gebruikt moeten worden. Het voornaamste belang van deze interceptieverdamping is dat water dat verdampt door interceptie niet in de bodem komt en dus niet beschikbaar is voor gewas verdamping of moet worden afgevoerd. Het is aan te bevelen om de interceptie verdamping, met name voor landbouw gewassen, nader uit te werken en te verbeteren.



<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Achtergrond en theorieën verdamping</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding	11
2.1.1	Openwater verdamping	12
2.1.2	Stedelijke verdamping	13
2.1.3	Interceptieverdamping	15
2.1.4	Gewasverdamping	15
2.1.5	Bodemverdamping	16
2.2	Referentie verdamping	17
2.2.1	Algemeen	17
2.2.2	Makkink	18
2.2.3	Penman-Monteith	18
2.2.4	Vergelijk Penman-Monteith en Makkink	20
<b>3</b>	<b>Metingen actuele verdamping</b>	<b>29</b>
3.1	Meetmethoden	29
3.1.1	Waterbalans van een gebied	29
3.1.2	Bodemvocht	30
3.1.3	Lysimeters	30
3.1.4	Verdampingspan	30
3.1.5	Sapstroom metingen	30
3.1.6	Eddy-correlatie methode	30
3.1.7	Bowen-ratio methode	31
3.1.8	Flux-profiel methode	31
3.1.9	Scintillometer	32
3.1.10	Remote Sensing methoden	32
3.2	Inventarisatie metingen	38
3.3	Vergelijk metingen	41
<b>4</b>	<b>Verdamping in hydrologische modellen</b>	<b>45</b>
4.1	Overzicht per model	45
4.1.1	SWAP	45
4.1.2	SIMGRO	46
4.1.3	SOBEK	46
4.1.4	Directe ET modellen	47
4.2	Gevoeligheid modelinvoer op verdamping	47
4.2.1	Penman-Monteith versus Makkink	47
4.2.2	Referentie ET versus SWAP interne berekening	49
4.2.3	Gevoeligheid SWAP parameters	52
4.2.4	Absolute versus relatieve nauwkeurigheid.	54
<b>5</b>	<b>Klimaatverandering</b>	<b>57</b>
5.1	KNMI Klimaatscenario's	57
5.2	CO <sub>2</sub> effect	59
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>63</b>
6.1	Korte termijn aanbeveling	64
6.2	Lange termijn aanbeveling	65
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>67</b>



## Tabellen

Tabel 1. Omrekeningsfactoren voor mm, MJ en Watts.....	11
Tabel 2. Decade gewasfactoren geldig voor Makkink (Feddes, 1987).....	17
Tabel 3. Gewasfactoren geldig voor Makkink. ....	17
Tabel 4. Vergelijking van gemeten en berekende dampspanning voor De Bilt 2001-2007.....	26
Tabel 5. Geraadpleegde personen voor de inventarisatie van metingen van actuele verdamping. .....	40
Tabel 6. Overzicht metingen. Voor details zie Appendix 1 .....	40
Tabel 7. Verschil in actuele verdamping bij gebruik Penman-Monteith en Makkink berekend met SWAP. Positief betekent Penman-Monteith hogere verdamping. ....	48
Tabel 8. Parameters gebruikt om gevoeligheid op verdamping te testen.....	53
Tabel 9. Resultaten gevoeligheidsanalyse. Aangegeven is het verschil in verdamping tussen de hoogste en de laagste parameter waarden in mm per jaar. ....	53
Tabel 10. Invloed verandering drainage afstand als functie van de referentie verdamping. Alle waarden in gemiddelde per jaar (1998-2007). ....	56
Tabel 11. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050. ....	58
Tabel 12. Gemiddelde procentuele verandering in referentie verdamping per maand voor het klimaat rond 2050 ten opzichte van het klimaat rond 1990 voor de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's. (Bron: <a href="http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/">http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/</a> ) .....	59

## Figuren

Figuur 1. Gemiddelde jaarlijkse referentie verdamping volgens Makkink (KNMI, 2000). ....	12
Figuur 2. Relatie tussen gemiddelde verdamping en groen oppervlak in een stad (source: Grimmond en Oke, 1999). ....	14
Figuur 3. Globale waterbalans van het landoppervlak voor de gehele aarde (source: Molden, 2008). ....	16
Figuur 4. Dagelijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998 en 2003). ....	21
Figuur 5. Dagelijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007). ....	23
Figuur 6. Jaarlijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007). ....	23
Figuur 7. Maandelijks gemiddelde referentie verdamping (in mm per dag) volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007). ....	24
Figuur 8. Frequentie van gemiddelde referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007). ....	24
Figuur 9. Schatting van de dampspanning gebaseerd op temperatuur. Boven: $T_{min}$ , midden: $T_{min}-2$ ; onder: $T_{min}$ en $T_{diff}$ . ....	25
Figuur 10. Invloed van verandering in gemiddelde temperatuur (links) en globale straling (rechts) op de Makkink referentie verdamping in mm per jaar.....	28
Figuur 11. Invloed van verandering in temperatuur (links boven), wind (rechts boven), dampspanning (links onder) en netto straling (rechts onder) op de Penman-Monteith referentie verdamping in mm per jaar.....	28
Figuur 12. Voorbeeld van remote sensing actuele verdampingstekort waarnemingen (bron: <a href="http://www.mijnakker.nl">www.mijnakker.nl</a> ). ....	34





Figuur 13. Voorbeeld van remote sensing actuele verdamping waarnemingen voor 2007 (bron: <a href="http://www.waterwatch.nl">www.waterwatch.nl</a> ) .	35
Figuur 14. Actuele verdamping voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor week 24 (boven) en 26 (onder) van 1995.	35
Figuur 15. Actuele verdamping voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt (boven: wekelijkse, onder: cumulatieve).	36
Figuur 16. Actuele verdamping bepaald met SEBAL voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt voor 1995.	36
Figuur 17. Actuele verdamping bepaald met SEBAL voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt voor de jaren 1998 (boven), 1999 (midden) en 2000 (onder).	37
Figuur 18. Vergelijk gemeten maandelijkse actuele verdamping voor Cabauw (gras) en Loobos (naaldbos) voor 2003.	42
Figuur 19. Vergelijk gemeten actuele verdamping en referentie verdamping voor Cabauw (boven) en Loobos (onder) voor 2003.	42
Figuur 20. Gemeten actuele verdamping voor Loobos (naaldbos) en referentie verdamping volgens Makkink en Penman-Monteith.	43
Figuur 21. Jaarlijkse en gemiddeld maandelijkse actuele verdamping voor Cabauw.	43
Figuur 22. Onderverdeling van de actuele verdamping in interceptie, plant en bodem (bron: Kroes et al., 2008).	45
Figuur 23. Reductie coëfficiënt ( $\alpha_{rw}$ ) voor wortelopname als functie van de drukhoogte in de bodem (Feddes et al., 1978).	46
Figuur 24. Verdampingstermen voor de twee SWAP modellen met Penman-Monteith.	49
Figuur 25. Vergelijk actuele verdamping berekend met SWAP over 10 jaar (boven: maïs; onder: gras).	50
Figuur 26. Actuele verdamping berekend met SWAP voor vier ET opties (boven: maïs; onder: gras).	51
Figuur 27. Potentiële verdamping berekend met SWAP voor vier ET opties (boven: maïs; onder: gras).	51
Figuur 28. Voorbeeld van invloed van model parameters op verdamping (boven: LAI; midden: KDIF; onder: HLIM1).	54
Figuur 29. Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's. G en G+ hebben een Gematigde opwarming van +1°C in 2050 t.o.v. 1990, terwijl W en W+ uitgaan van een Warmer klimaat (+2°C). De "+" geeft aan dat in de scenario's rekening wordt gehouden met een sterke verandering van de gemiddelde luchtstromingen.	58
Figuur 30. Toename referentie verdamping voor 2050 (boven) en 2100 (onder).	59
Figuur 31. Toename in biomassa bij een CO <sub>2</sub> toename van 300 ppm voor tarwe. Resultaten van 197 publicaties. Bron: <a href="http://www.co2science.org">http://www.co2science.org</a> .	61
Figuur 32. Toename in biomassa bij een CO <sub>2</sub> toename van 300 ppm voor aardappelen. Resultaten van 34 publicaties. Bron: <a href="http://www.co2science.org">http://www.co2science.org</a>	61





# 1 Inleiding

Verdamping is, na neerslag, voor de meeste gebieden in Nederland de grootste component van de waterbalans. Het is voor waterbeheerders daarom van belang om de actuele verdamping zo goed mogelijk vast te stellen, voor zowel beleidsmatige als operationele beslissingen. Daarnaast zal klimaatverandering de vraag naar water doen toenemen en het watertekort, gedefinieerd als de potentiële verdamping minus de actuele verdamping, doen toenemen. De Deltacommissie heeft op grond van dit toenemend watertekort dan ook al voorgesteld om het IJsselmeer peil te verhogen met 1,50 meter. Daarnaast is voor de regionale waterbeheerders het juist inschatten van de actuele verdamping essentieel, omdat de neerslag minus de actuele verdamping bepaalt hoeveel water moet worden uitgeslagen. Een goede inschatting van de actuele verdamping is dus aan de ene kant belangrijk bij het opstellen van maatregelen voor wateraanvoer, maar aan de andere kant ook noodzakelijk voor stofstroom analyses voor de KRW. Een verkeerde inschatting van verdamping leidt tot onder- dan wel overschatting van andere bronnen in water- en stoffenbalansen, met onzekerheid in de effectiviteit van brongerichte maatregelen tot gevolg.

Er bestaat geen gestandaardiseerde aanpak bij regionale waterbeheerders om de actuele verdamping te schatten. Diverse methoden worden gebruikt en de nauwkeurigheid is vaak laag en bijna altijd onbekend. De STOWA heeft daarom op initiatief van de Adviesgroep Programma-Commissie Watersysteemonderzoek (PCW) een project gestart 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.”**

De drie afgeleide doelstellingen van het project kunnen samengevat worden als:

- Aanbevelingen voor de verbetering van de schatting van de actuele verdamping gebaseerd op huidige kennis en inzichten.
- Aanbevelingen voor een onderzoeksprogramma om de schatting van de actuele verdamping in de toekomst te verbeteren.
- Overzicht en inventarisatie van actuele verdampingmetingen in Nederland en beschikbare metingen ontsluiten.

In het plan van aanpak zijn de volgende stappen gedefinieerd waarmee de doelstelling van dit project zullen verwezenlijken:

- 1 Evalueren bestaande studies en rapporten
  - 1.1 Verdampingstheorieën/methoden
  - 1.2 Meetmethoden
  - 1.3 Modelberekeningen
- 2 Inventariseren beschikbare metingen actuele verdamping
  - 2.1 Overzicht
  - 2.2 Beschikbaarheid
  - 2.3 Verzamelen
- 3 Kwantitatieve analyses
  - 3.1 Potentiële verdamping
  - 3.2 Model gevoeligheid
  - 3.3 Vergelijk metingen
- 4 Synthese



- 4.1 Kort termijn verbeteringen
- 4.2 Lange termijn aanbevelingen
- 5 Rapportage
- 6 Overleg/presentatie

De studie is verder afgebakend door de nadruk te leggen op het strategische waterbeheer en minder op het operationele waterbeheer. Hierdoor komt de nadruk te liggen op modellen en beschikbare metingen om zodoende tot modellen te komen die beter en nauwkeuriger de actuele verdamping kunnen simuleren. Verder moet de studie vooral gezien worden als een definitiestudie: waar staan we nu en op welke manier kunnen we verder gaan.

Dit rapport beschrijft de gevolgde werkwijze, de resultaten en de conclusies van deze studie naar de verbetering van de schatting van de actuele verdamping voor de regionale waterbeheerders in Nederland. Het rapport heeft de intentie om kort en bondig te beschrijven wat de huidige stand van zaken is en wat op de korte termijn en op de lange termijn verbeterd kan worden.

In hoofdstuk 2 worden als eerste de concepten van verdamping kort beschreven, gevolgd door een analyse van de verschillende methoden voor het bepalen van referentie verdamping met nadruk op Makkink en Penman-Monteith. Het volgende hoofdstuk richt zich op metingen van de actuele verdamping. Eerst zal er een overzicht van verschillende meetmethoden worden gegeven, daarna zal de inventarisatie van metingen worden gepresenteerd. Vervolgens zal een eerste analyse worden gepresenteerd op grond van een aantal meetresultaten. In hoofdstuk 4 ligt de nadruk op simulatiemodellen in het waterbeheer en in het bijzonder het SWAP model, wat algemeen gezien wordt als het standaard model bij het simuleren van actuele verdamping. Hoofdstuk 5 gaat kort in op klimaatverandering en verdamping. Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen die zullen leiden tot een betere schatting van de actuele verdamping.



## 2 Achtergrond en theorieën verdamping

### 2.1 Inleiding

Verdamping is het proces waarbij water in vaste of vloeibare vorm overgaat in damp. Het verdampingsproces vindt plaats op het grensvlak van atmosfeer en landoppervlak en wordt direct of indirect gevoed door de energie van de zon. De actuele verdamping hangt enerzijds af van het weer, en, in tegenstelling tot neerslag, met eigenschappen van het aardoppervlak. Deze eigenschappen zijn sterk veranderlijk in tijd en plaats en worden niet routinematig gemeten. Enkele voorbeelden hiervan zijn: nettostraling, vochtgehalte van de bodem, gewashoogte, watertemperatuur, bedekkinggraad van de bodem etc.

Het fundamentele uitgangspunt van de verdamping wordt gegeven door de energiebalansvergelijking:

$$\lambda E = R_n - H - G$$

met:

$E$  = verdampingsflux ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  = verdampingswarmte van water ( $2.45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )

$R_n$  = nettostraling ( $\text{W m}^{-2}$ )

$H$  = voelbare warmteflux ( $\text{W m}^{-2}$ )

$G$  = bodemwarmteflux ( $\text{W m}^{-2}$ )

De energievergelijking zegt simpelweg dat alle beschikbare straling gebruikt wordt voor de sturing van een drietal processen: opwarmen van de lucht, opwarmen van de bodem, en verdampen van water. De volledige vergelijking bevat nog drie andere termen die vaak worden weggelaten (Moors, 2008):

- laterale advectione warmteflux: van belang bij puntmetingen, veel wind en grote ruimtelijke gradiënten
- warmteopslag in vegetatie: vaak erg klein
- fotosynthetisch opslag: energie gebruikt voor het fotosynthese proces van vegetatie, verwaarloosbaar klein.

De verdampingsflux, ook wel aangeduid met latente flux, wordt meestal uitgedrukt in  $\text{W m}^{-2}$  of in MJ. Om dit om te rekenen naar  $\text{mm d}^{-1}$  kan de volgende tabel gebruikt worden:

**Tabel 1. Omrekeningsfactoren voor mm, MJ en Watts.**

	$\text{mm d}^{-1}$	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	$\text{W m}^{-2}$
$1 \text{ mm d}^{-1}$	1.000	2.451	28.368
$1 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	0.408	1.000	11.574
$1 \text{ W m}^{-2}$	0.035	0.086	1.000

Vaak wordt de term “verdamping<sup>1</sup>” gebruikt zonder dat precies wordt gespecificeerd wat bedoeld wordt. Het eerste onderscheid dat moet worden gemaakt is of er gerefereerd wordt aan

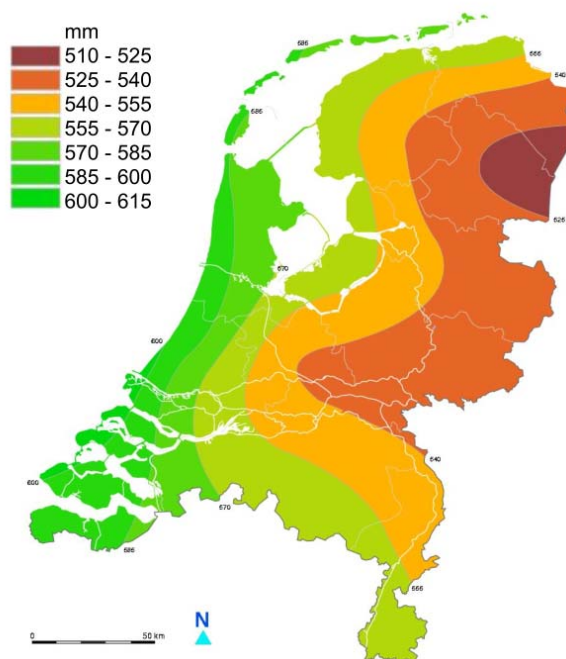
<sup>1</sup> De term “verdamping” wordt in dit rapport gebruikt in algemene zin. In andere gevallen zal gebruik gemaakt worden van de specifieke aanduidingen zoals: bodem~, potentiële ~, actuele ~, interceptie ~, etc.



de actuele- of de potentiële- of de referentie verdamping. De referentie verdamping wordt sinds 1987 in Nederland standaard bepaald met behulp van de Makkink methode. Deze referentie verdamping kan vervolgens met behulp van de gewasfactoren omgezet worden naar de potentiële verdamping. Afhankelijk van de vochttoestand (en eventuele ziekten en plagen) volgt dan de actuele verdamping.

De referentie verdamping is vooral afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid zon en is daarmee in de zomermaanden belangrijk hoger dan gedurende de winter. In De Bilt is de referentie verdamping normaal ongeveer 540 mm gedurende een heel jaar. Over de gehele maand januari bedraagt deze circa 8 mm tegen omstreeks 90 mm gedurende de gehele maand juli. Van jaar tot jaar varieert de referentie verdamping tussen de 497 en 629 mm. Aan het begin van het groeiseizoen (begin april) is de referentie verdamping gemiddeld ongeveer 1,5 mm per dag. Naarmate het groeiseizoen vordert, loopt dit op tot circa 3 mm per dag begin juli (Jilderma, 2008). De ruimtelijke spreiding van de referentie verdamping is te zien in Figuur 1.

Een ander belangrijk onderscheid waar de algemene term “verdamping” naar verwijst, is van welk oppervlak dit komt. De belangrijkste zijn: openwater, verhard (stedelijk) gebied, plant, kale grond en interceptie (water op gewas/oppervlak).



**Figuur 1. Gemiddelde jaarlijkse referentie verdamping volgens Makkink (KNMI, 2000).**

### 2.1.1 Openwater verdamping

In de loop der tijd zijn verschillende methoden ontwikkeld om de openwater verdamping te berekenen. Veel van deze methoden zijn of verouderd of alleen voor lokaal gebruik of minder geschikt voor openwater verdamping. Vaak wordt de actuele verdamping van openwater simpel bepaald door de Makkink referentie verdamping met 1.25 te vermenigvuldigen. De aannames die bij Makkink gelden zijn: (i) de bodemwarmtestroom ( $G$ ) kan worden verwaarloosd ten opzichte van de nettostraling ( $R_n$ ) en (ii) de nettostraling ongeveer de helft van de globale straling ( $K_{in}$ ) bedraagt. De eerste aanname is alleen geldig voor een landoppervlak en de tweede aanname gaat uit van gemiddelde zomercondities in Nederland (Feddes et al., 2003).



De Bruin en Keijman (1979) pasten de Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972) methode toe op het voormalige Flevomeer. Voor de zomer leverde deze methode goede resultaten op, maar over het gehele jaar gezien bleken er grote afwijkingen op te treden. De Bruin en Keijman ontwikkelden een nieuwe empirische relatie die beter voldeed, namelijk:

$$\lambda E = \alpha' \frac{s}{s + \gamma} (R_n - G) + \beta$$

met

$E$  = verdampingsflux ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  = verdampingswarmte van water ( $2.45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )

$\alpha'$  = constante = 1.1

$R_n$  = nettostraling ( $\text{W m}^{-2}$ )

$s$  = afgeleide van  $e_w$  bij luchttemperatuur  $T$  ( $\text{Pa K}^{-1}$ ), dus  $s = \frac{de_w}{dT}$

$\gamma$  = psychrometerconstante ( $\text{Pa K}^{-1}$ )

$G$  = bodemwarmteflux ( $\text{W m}^{-2}$ )

$\beta = 10 \text{ W m}^{-2}$

en  $G$  is gedefinieerd als

$$G = \rho_w c_w h \frac{\partial T_{\text{water}}}{\partial t}$$

met

$G$  = bodemwarmteflux ( $\text{W m}^{-2}$ )

$\rho_w$  = dichtheid van water (=  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ )

$c_w$  = soortelijke warmte van water (=  $4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$h$  = waterdiepte

$T_{\text{water}}/t$  = verandering van de watertemperatuur (K) met de tijd (s)

Algemeen wordt deze bepaling van de openwater verdamping nog steeds als de standaard beste methode gezien. Gebruik makend van standaard meteorologische gegevens van het KNMI kan bovenstaand methode worden gevolgd. Uitzondering vormt de netto straling die kan worden geschat uit de globale straling en de waterdiepte die geschat kan worden uit gegevens van waterbeheerders. Voor de lange termijn is het aan te bevelen, gezien het voortschrijdend inzicht en verbeteringen in metingen om de openwater verdamping verder te analyseren.

Aanbeveling korte termijn

Voor het bepalen van de openwater verdamping kan beter gebruik gemaakt worden van de Bruin en Keijman methode dan van de Makkink x 1,25 regel.

Aanbeveling lange termijn

Een onderzoek starten om de nauwkeurigheid van de bepaling van de openwater verdamping te verbeteren.

### 2.1.2 Stedelijke verdamping

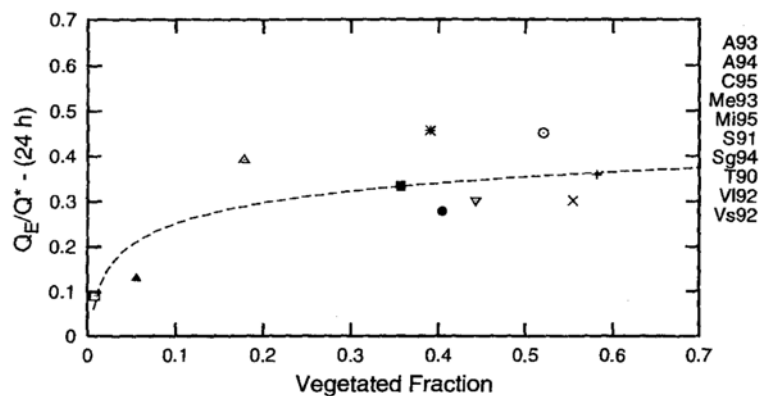
Met de toenemende verstedelijking is het nauwkeurig bepalen van de actuele verdamping van bebouwd gebied belangrijk. De grootte van de actuele verdamping wordt beïnvloed door twee tegengestelde effecten. Aan de ene kant wordt regenwater in de stad sneller afgevoerd dan



daarbuiten. Het regenwater heeft minder de tijd om te verdampen, voordat het in het riool verdwijnt. Aan de andere kant is een stad echter vaak warmer dan de landelijke omgeving en is een grotere actuele verdamping te verwachten.

In 2008 is een eerste experiment in Nederland gestart om de verdamping van een stad, Utrecht, te meten. Het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft eddy-correlatie meet-apparatuur geplaatst op het dak van het Provinciehuis in Utrecht. Resultaten zullen in 2009 beschikbaar komen.

In het algemeen wordt de bepaling van de actuele verdamping van stedelijke gebieden uitgevoerd door per type landgebruik de actuele verdamping te bepalen en deze dan naar ratio van de oppervlakte op te tellen (Cleugh et al., 2005). Een typisch voorbeeld is om onderscheid te maken tussen doorlatende en ondoorlatende oppervlakten (Hermans et al., 2008).



**Figuur 2. Relatie tussen gemiddelde verdamping en groen oppervlak in een stad (source: Grimmond en Oke, 1999).**

Voor een groot aantal Amerikaanse steden en klimaten is een relatie gevonden tussen de stedelijke verdamping en het oppervlakte groen (Grimmond en Oke, 1999). Als door Figuur 2 een lijn wordt gefit, blijkt dat een exponentiële fit de gevonden punten goed verbindt. Op grond van deze fit geldt dan de volgende relatie tussen stedelijke verdamping en groen oppervlak:

$$E_{act} = ET_{ref} \cdot 0.415 \cdot VF^{0.223}$$

met

- $E_{act}$  = actuele verdamping van stad ( $\text{mm d}^{-1}$ )
- $ET_{ref}$  = referentie verdamping ( $\text{mm d}^{-1}$ )
- VF = fractie vegetatie (-)

Volgens de gegevens van het CBS (2008) besloeg het stedelijk gebied in 1970 8% van het oppervlak in Nederland. In 2003 is dit toegenomen tot ruim 13%. Volgens de definitie van het CBS valt onder stedelijk gebied alle bebouwing, zoals huizen, kantoren, fabrieken. Daarnaast worden ook de (meeste) wegen binnen de bebouwde kom meegerekend en het stedelijk groen, zoals parken en plantsoenen. Het is dus niet precies bekend welk oppervlakte van Nederland nu werkelijk verhard is en dus een specifieke actuele verdamping heeft.

Dit werkelijke verharde oppervlak zou bepaald kunnen worden door een gedifferentieerde landgebruikskaart van stedelijk gebied te maken. Dit zou kunnen op basis van het GBKN en/of via top-10 met kentallen voor verharding in terrassen en opritten.





Aanbeveling korte termijn

Bij het bepalen van de actuele verdamping moet een precieze inschatting gemaakt worden van het totale verhard oppervlak en niet worden uitgegaan van de in statistieken genoemde oppervlakte “stedelijk” of “bebouwd” gebied. Vervolgens kan per landgebruik type de actuele verdamping worden geschat en deze per ratio naar oppervlakte worden gesommeerd tot de totale actuele verdamping.

Aanbeveling lange termijn

Gezien het belang van stedelijke verdamping is het aan te bevelen om op basis van metingen en onderzoek het inzicht te verdiepen in de werking van de stedelijke verdamping.

### 2.1.3 *Interceptieverdamping*

De interceptieverdamping is gedefinieerd als het deel van de bruto neerslag dat door de vegetatie of andere structuren wordt onderschept en vervolgens verdampt. Er wordt vaak aangenomen dat het water dat opgevangen wordt door interceptie nog dezelfde dag verdampt. Onder zomerse omstandigheden en voor landbouwgewassen is deze aanname vaak correct, maar de hoeveelheid water die vast gehouden wordt per gewas en gewasstadium is echter niet goed bekend. Hierdoor is dus ook niet bekend hoeveel neerslag uiteindelijk in de bodem komt en dus beschikbaar is voor opname door de wortels.

De grootte van de interceptieverdamping hangt van een veelheid van factoren af. Zo kan de interceptieverdamping in vochtige en koude gebieden rond de 10% bedragen, terwijl in droge en warme gebieden dit op kan lopen tot 70% (Groen en Savenije, 2003) Voor bossen kan de interceptieverdamping bijna even groot zijn als de gewasverdamping (Tiktak en Bouten, 1994). Voor landbouwgewassen en gras worden waarden tot ongeveer 100 mm per jaar gezien als gemiddeld (Massop et al., 2005).

Er bestaat echter geen duidelijk overzicht van de grootte van de interceptie verdamping bij verschillende landbouwgewassen onder verschillende groeistadia. Wel zijn er in de literatuur waarden te vinden van losstaande experimenten, en het zou nuttig zijn om deze te verzamelen en toepassingsgericht te ordenen.

Aanbeveling lange termijn

Een literatuurstudie opstarten naar interceptieverdamping voor landbouwgewassen en hoe deze beter in modellen is toe te passen.

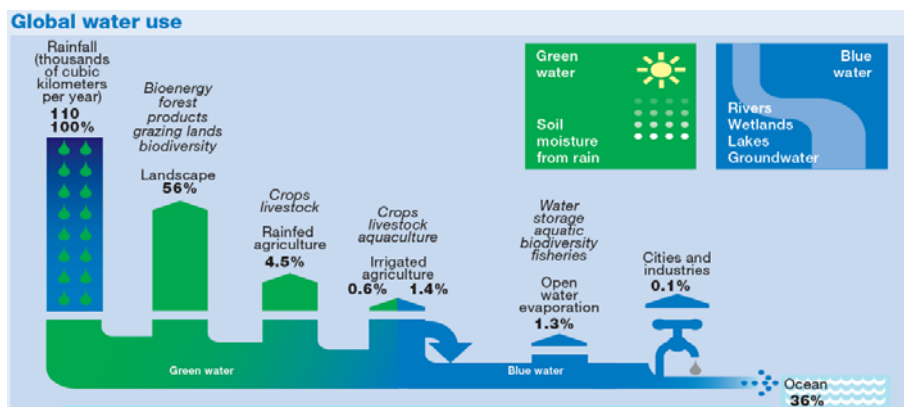
### 2.1.4 *Gewasverdamping*

Actuele verdamping van een gewas wordt ook wel aangeduid als transpiratie. Interessant is dat meestal minder dan 1% van de actuele gewastranspiratie ook werkelijk door het gewas wordt opgeslagen. Koolzuurgas is de enige bron van koolstof voor planten. Het inademen van CO<sub>2</sub> gebeurt overwegend via diffusie door de huidmondjes. Planten moeten hun huidmondjes dus openzetten om CO<sub>2</sub> te kunnen consumeren, maar daarmee diffundeert tevens waterdamp uit de plant. Planten moeten dus water verliezen om CO<sub>2</sub> te kunnen opnemen. Verder transpireren planten soms water om hun interne temperatuur te verlagen.



Op wereldschaal is de actuele verdamping van gewassen veel groter dan bijvoorbeeld het gebruik van water in steden en industrie (Figuur 3). Wereldwijd wordt er ook veel meer water verdampt door natuurlijke vegetatie dan door landbouw (Molden, 2008).

De situatie in Nederland is anders waar het merendeel van de neerslag vooral door landbouw gewassen (inclusief grasland) wordt verdampt. In een gemiddeld jaar wordt ongeveer twee-derde van de totale neerslag verdampt. Het is echter niet duidelijk welk percentage van de gewastranspiratie afkomstig is en welk percentage van de bodemverdamping.



**Figuur 3. Globale waterbalans van het landoppervlak voor de gehele aarde (source: Molden, 2008).**

### 2.1.5 Bodemverdamping

Bodemverdamping, soms ook wel aangeduid als kale grond verdamping, wordt vaak samen genomen met de gewastranspiratie als de actuele evapotranspiratie. Het bepalen van welke component van de actuele evapotranspiratie afkomstig is van het gewas en welke van de bodem is in de praktijk erg moeilijk te bepalen.

Toch is het van belang om de bodemverdamping apart en nauwkeurig te bepalen. Indien water schaars is, kan gewastranspiratie gezien worden als een nuttig gebruik omdat vegetatie hierdoor groeit. Het nut van bodemverdamping is echter beperkt en wordt vaak gezien als een verlies van water, dat in tijden van schaarste geminimaliseerd moet worden.

In praktijk is de enige methode om een onderscheid te maken tussen gewastranspiratie en bodemverdamping met behulp van modellen. De bestaande meetmethoden hiervoor (sapstroommetingen, micro-lysetimeters) zijn vooral in gebruik voor puur wetenschappelijke doeleinden. Het is echter aan te bevelen om bij het rapporteren van actuele verdamping dit onderscheid, indien bekend uit bijvoorbeeld modellen, wel altijd te noemen.

#### Aanbeveling korte termijn

Bij het bepalen van de actuele verdamping is het van belang om ook altijd een schatting te maken van de twee componenten gewastranspiratie en bodemverdamping afzonderlijk. Deze aanbeveling geldt in mindere mate voor hydraulische modellen en is met name belangrijk voor modellen waarbij wateraanvoer in relatie tot gewasgroei wordt geanalyseerd.



## 2.2 Referentie verdamping

### 2.2.1 Algemeen

De formele definitie van de referentie verdamping is (KNMI, 2005):

*“De referentie gewasverdamping is de evapotranspiratie van een uitgebreid uniform, bodembedekkend, van buiten droog grasoppervlak met een hoogte van 8 tot 15 cm (“standaard” gras), dat voldoende van water is voorzien”*

De referentie verdamping kan vervolgens gebruikt worden om de potentiële verdamping te berekenen, gebruik makend van de zogenoemde gewasfactoren.

$$ET_{pot} = k_c \cdot ET_{ref}$$

met

$ET_{pot}$  = potentiële verdamping (mm d<sup>-1</sup>)

$k_c$  = empirische gewasfactor onder optimale groeicondities (-)

Voor optimale groeicondities kunnen standaard  $k_c$  gewascoëfficiënten worden gebruikt zoals die in de literatuur zijn te vinden (bijv. Feddes, 1987; Doorenbos and Pruitt, 1975). Voor landbouwgewassen zijn standaard waarden te zien in Tabel 2, voor enkele ander vegetatietypen in Tabel 3.

**Tabel 2. Decade gewasfactoren geldig voor Makkink (Feddes, 1987)**

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

**Tabel 3. Gewasfactoren geldig voor Makkink.**

	(1)	(2)	(3)	(4)
Grasland	0.7	1.0	1.0	0.8
Bouwland	0.6	0.9	0.8	0.9
Loofbos		1.2	1.0	0.8
Loofbos (inc heide)	0.8			
Naaldbos	0.9	1.2	1.1	0.8
Open water		1.3		
Verhard oppervlak	0.3	0.3		

(1) = jaarlijks gemiddelde volgens Jansen et al., 2004

(2) = jaarlijks gemiddelde volgens Roelsma et al., 2008

(3) = jaarlijks gemiddelde volgens Pastoors, 1992

(4) = zomers gemiddelde volgens Pastoors, 1992



Er bestaan wereldwijd ongeveer 50 methoden om de referentie verdamping te bepalen (Lu et al., 2005), waarvan vaak weer veel lokaal-specifieke varianten bestaan. In de wetenschappelijke literatuur zijn talloze publicaties te vinden waar verschillende referentie verdampingmethoden worden vergeleken (bijv. Jensen et al., 1990; Lu et al., 2005, Droogers and Allen, 2002; Allen et al., 1998; Itenfisu, et al., 2003; Irmak, et al., 2003). Uit deze publicaties komt een duidelijke consensus naar voren dat de Penman-Monteith aanpak verreweg de beste is en beschouwd wordt als de de-facto standaard. Wel heeft Penman-Monteith veel invoergegevens nodig die niet altijd voorhanden zijn. Sommige van de gegevens die nodig zijn voor Penman-Monteith zijn niet eenvoudig nauwkeurig te meten, waardoor andere referentie verdampingmethoden (o.a. Priestly-Taylor, Hargreaves, Thornthwaite) uiteindelijk toch nauwkeuriger kunnen zijn (Droogers and Allen, 2002). Deze alternatieve methoden hebben wel allemaal gemeen dat ze lokaal specifiek gekalibreerde parameters nodig hebben, vaak alleen geldig voor wat grotere tijdstappen, en minder fysisch gebaseerd zijn.

Voor Nederland specifiek is de publicatie van De Bruin (1987) bepalend geweest voor het KNMI om over te stappen van de toenmalige Penman methode naar de Makkink methode. Interessant is dat deze overstap van Penman naar Makkink gedeeltelijke bepaald werd door wetenschappelijke inzichten, maar ook omdat de gebruikte term “verdamping van een vrij wateroppervlak” veelvuldig aanleiding gaf tot verwarring en onjuist gebruik. Gebruikers zagen niet direct de link dat deze term dan ook kon worden gebruikt voor het bepalen van de potentiële verdamping.

In het kader van deze studie zijn er twee methoden die interessant zijn om verder te analyseren op sterke en zwakke kanten: Penman-Monteith en Makkink. De keuze voor alleen deze twee is omdat Makkink de standaard is voor Nederland en Penman-Monteith de internationale standaard is.

### 2.2.2 Makkink

De referentie verdamping volgens Makkink is gebaseerd op de Priestley-Taylormethode en werd in 1957 door Makkink gepubliceerd (Makkink, 1957). De Makkinkmethode vereist alleen een meting van de temperatuur en de globale straling:

$$\lambda ET = 0.65 \frac{s}{s + \gamma} K_{in}$$

waarin:

- $\lambda ET$  = latente warmtestroom ( $W m^{-2}$ )
- $s$  = afgeleide van  $e_{sat}$  bij luchttemperatuur  $T$  ( $kPa K^{-1}$ )
- $\gamma$  = psychrometerconstante ( $kPa K^{-1}$ )
- $K_{in}$  = dagsom globale straling ( $W m^{-2}$ )

Zoals al eerder vermeld onder de sectie “openwater verdamping” zijn de aannames voor de Makkink methode dat de bodemwarmtestroom ( $G$ ) kan worden verwaarloosd ten opzichte van de nettostraling ( $R_n$ ) en dat de nettostraling ongeveer de helft van de globale straling ( $K_{in}$ ) bedraagt. De eerste aanname is alleen geldig voor een landoppervlak en de tweede aanname gaat uit van gemiddelde zomercondities in Nederland (Feddes et al., 2003).

### 2.2.3 Penman-Monteith

De standaardtheorie voor de berekening van openwater verdamping is in 1948 door Penman gepresenteerd (Penman, 1948). Penman stelde een semi-empirische vergelijking op



betreffende de verdamping van openwater. Deze vergelijking schat de verdamping uit standaard meteorologische waarnemingen, namelijk de windsnelheid, temperatuur en luchtvochtigheid op standaard waarnemingshoogte (dus op een niveau) en relatieve zonneshijnduur. Monteith (1965) verfijnde de Penman formule naar land oppervlakte naar wat nu bekend staat als Penman-Monteith (De Bruin, 1996).

De Penman-Monteith methode is gebaseerd op de energiebalansvergelijking en aparte vergelijkingen voor de voelbare warmtestroom (H) en de latente warmtestroom ( $\lambda E$ ). Verder gebruikt Penman-Monteith een linearisatie van de dampdruk (e) om de vergelijkingen te kunnen oplossen. De volledige Penman-Monteith formule voor het referentie gewas luidt:

$$ET = \frac{0.408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 [e_s - e_a]}{s + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

waarin:

- s = afgeleide van  $e_{\text{sat}}$  bij luchttemperatuur T ( $\text{kPa K}^{-1}$ )
- Rn = nettostraling ( $\text{W m}^{-2}$ )
- G = bodemwarmtestroom ( $\text{W m}^{-2}$ )
- $\rho$  = dichtheid van lucht ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $c_p$  = soortelijke warmte van lucht bij constante druk ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
- $r_a$  = aerodynamische weerstand ( $\text{s m}^{-1}$ )
- $e_w$  = verzadigingsdampdruk t.o.v. (onderkoeld) water bij temperatuur T (Pa)
- T = temperatuur in Kelvin (K)
- e = partiele dampdruk van water (Pa)
- s = afgeleide van  $e_w$  bij luchttemperatuur T ( $\text{Pa K}^{-1}$ ), dus  $s = \frac{de_w}{dT}$
- $\gamma$  = psychrometerconstante ( $\text{Pa K}^{-1}$ )

Concreet zijn dus voor Penman-Monteith de volgende dagelijkse metingen nodig:

- Minimale temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Maximale temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Minimale luchtvochtigheid (kPa)
- Maximale luchtvochtigheid (kPa)
- Gemiddelde windsnelheid ( $\text{m s}^{-1}$ )
- Nettostraling ( $\text{W m}^{-2}$ ).

Indien metingen missen zijn er vele mogelijkheden om aannames te doen om deze te schatten. Allen et al. (1998) geeft een uitgebreid overzicht voor een groot aantal van deze schattingsmogelijkheden.

Het eerste deel van de formule is de stralingsterm en het tweede deel de aerodynamische term (Feddes et al., 2003). De publicatie van de Penman-Monteith formule door de FAO in 1998 heeft gezorgd dat de methode nu wereldwijd gezien wordt als de standaard (Allen et al, 1998). Parallel aan deze ontwikkeling liep de acceptatie van Penman-Monteith als de standaard door de American Society of Civil Engineers (Allen et al., 2006).



## 2.2.4 Vergelijk Penman-Monteith en Makkink

### 2.2.4.1 Literatuur

Conceptueel bestaat er een groot verschil tussen de beide methoden. Makkink gaat ervan uit dat alleen de straling bepalend is voor de referentie verdamping, terwijl Penman-Monteith ook een aerodynamisch component bevat. Het meenemen van de aerodynamische component zou vanuit een strikte definitie van de referentie verdamping niet nodig zijn, aangezien ervan wordt uitgegaan dat verdamping alleen afhangt van de beschikbare energie die dus van de straling van de zon komt. Over zeer grote oppervlakten en lange tijdsperiode is deze aanname volledig correct. In de praktijk willen we de referentie verdamping echter gebruiken voor dagelijkse tijdstappen en kleinere oppervlakten en is de aerodynamische (advectieve) component wel degelijk van belang. Hoewel niet expliciet meegenomen houdt Makkink ook rekening met deze aerodynamische component door de empirische geschatte constante van 0,65.

Dit rapport richt zich vooral op strategische studies en het is dan ook van belang wat de voordelen van Makkink ten opzicht van Penman-Monteith zijn bij inschattingen van de effecten van klimaatverandering. De Makkink constante (en de daarbij behorende gewasfactoren) zijn empirische bepaald onder het huidige klimaat. De klimaatscenario's geven echter aan dat de luchtvochtigheid, en advectie en alle terugkoppelingen van de grenslaag, gaan veranderen. De empirische parameters zullen dan ook niet geldig zijn voor de toekomst.

Er zijn een groot aantal studies uitgevoerd waarbij de referentie verdamping van Penman-Monteith en Makkink zijn vergeleken met werkelijk metingen aan gras dat onder referentie omstandigheden groeide. Enkele relevante voor dit onderzoek zijn:

- Bruin en Stricker (2002). Makkink was minder nauwkeurig dan andere methoden (Penman en Priestly-Taylor), maar wel praktischer. Conclusies waren gebaseerd op maïs en vergeleken met Bowen-ratio metingen voor de jaren 1979 tot en met 1982.
- Bruin en Lablans (1998). Makkink aantrekkelijk vanwege beperkte invoergegevens. Maar gegevens voor Penman-Monteith zijn tegenwoordig ook standaard beschikbaar.
- Van Kralingen en Stol (1997). Makkink onderschat de referentie verdamping. Conclusies gebaseerd op metingen in Wageningen in 1980.
- Amatya et al., 1995. Makkink onderschat de referentie verdamping voor de hogere waarden in North Carolina.
- Yoder et al., (2005). Makkink onderschat de referentie verdamping voor de hogere waarden in het zuidoosten van de Verenigde Staten.
- Dolman et al., (1999). Makkink onderschat referentie verdamping in de winter, Penman-Monteith geeft betere resultaten. Conclusies gebaseerd op eddy-correlatie metingen voor winter 1998 op de Sinderhoeve (Heelsum)
- Koerselman (2001). Een vergelijkende studie tussen Makkink en SEBAL voor de randmeren liet weinig verschil zien tussen de resultaten van de twee methoden. Conclusie was wel dat vooral Makkink minder geschikt was voor openwater en dat in de toekomst Penman getest zou moeten worden.
- Van de Velde (2004) heeft voor een studentenonderzoek aan de hand van meetgegevens aan lysimeters in Duitsland (Mönchengladbach) Penman-Monteith en Makkink vergeleken. De belangrijkste conclusie is dat Makkink over het geheel de gemeten referentie verdamping beter benaderd dan Penman-Monteith. Echter, tijdens dagen met hoge referentie verdamping onderschat Makkink en geeft Penman-Monteith een betere benadering.
- Duineveld (2008) heeft ook in het kader van een studentenonderzoek voor het meteorologisch station Haarweg in Wageningen voor het jaar 2005 Penman-Monteith



en Makkink vergeleken met Eddy-correlatie metingen. Resultaten lieten zien dat zowel Penman-Monteith en Makkink de gemeten actuele verdamping overschatten, waarbij Penman-Monteith een iets grotere overschatting liet zien.

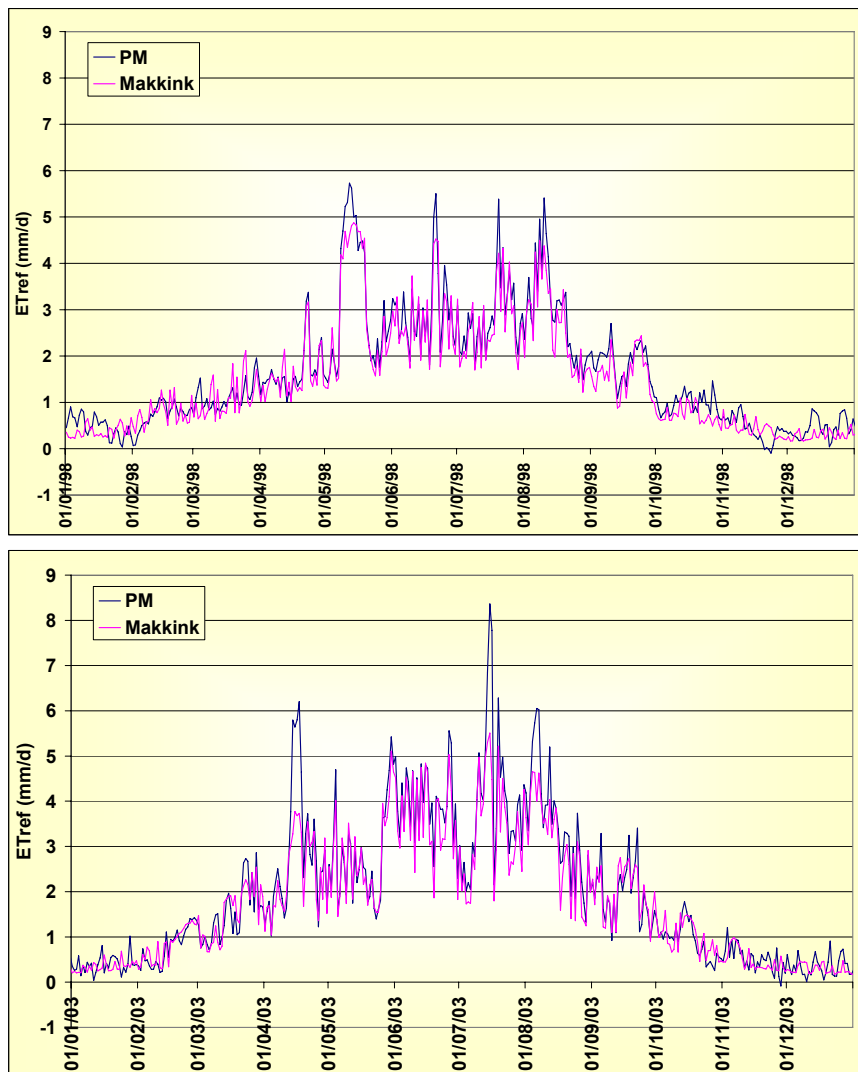
Samenvattend kan geconcludeerd worden dat het merendeel van de studies aangeven dat Penman-Monteith een betere schatting van de referentie verdamping geeft dan Makkink. De laatste twee genoemde studentenonderzoeken geven echter aan dat Makkink voor niet al te droge dagen betere schattingen geeft. Daarnaast wordt altijd de beperktere meet inspanningen voor Makkink genoemd.

Aanbeveling korte termijn

Bij toepassingen waar droogte en dus hoge verdamping van belang zijn kan de referentie verdamping beter met Penman-Monteith worden berekend dan met Makkink.

Aanbeveling lange termijn

Brede discussie opstarten of Nederland de Penman-Monteith methode als standaard moet gaan gebruiken.



Figuur 4. Dagelijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998 en 2003).



#### 2.2.4.2 Vergelijk Penman-Monteith en Makkink

Voor de periode 1998 tot en met 2007 zijn Penman-Monteith en Makkink met elkaar vergeleken, gebruik makend van de metingen uit De Bilt. Een aantal figuren zijn geplot om de verschillen en overeenkomsten te demonstreren. Op grond van Figuur 5 tot en met Figuur 8 zijn de volgende conclusies te trekken:

- De Makkink referentie verdamping komt niet boven de  $6 \text{ mm d}^{-1}$  uit.
- In de winter laat Makkink minder variatie zien dan Penman-Monteith.
- De jaarlijkse referentie verdamping ligt voor Penman-Monteith gemiddeld 10% boven die van Makkink.
- Makkink berekent vaker zeer kleine referentie verdamping in de orde van  $0-1 \text{ mm d}^{-1}$ .
- Penman-Monteith berekent soms negatieve referentie verdamping.

Van belang is om te benadrukken dat het hier een onderlinge vergelijking betreft en geen uitspraak doet over de absolute nauwkeurigheid van één van beide methoden.

Op 4 december 2008 heeft er overleg plaatsgevonden met drie onderzoekers van het KNMI: Adri Buishand, Jules Beersma, en Fred Bosveld. Joost Heijkers en Peter Droogers waren aanwezig namens dit verdampingsproject. Puntsgewijs zijn de volgende zaken naar voren gekomen:

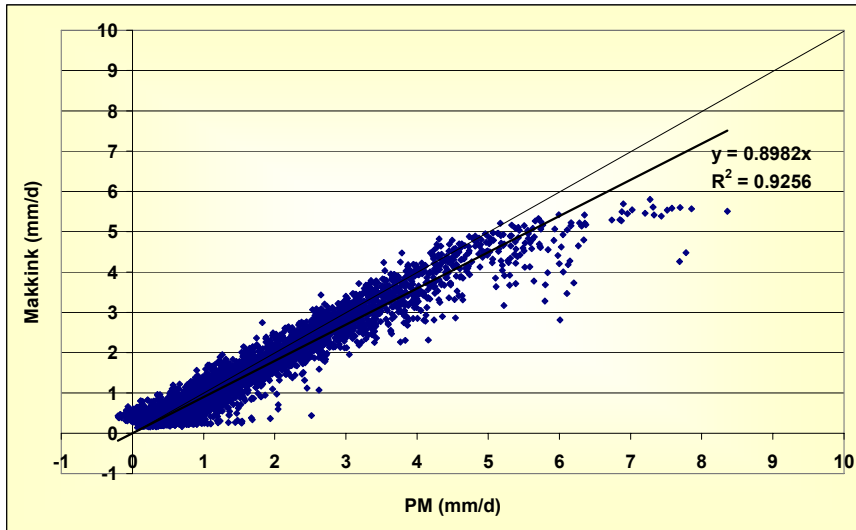
- Het meten van de actuele verdamping is in Nederland een onderbelichte zaak. Het KNMI heeft hier niet voldoende kennis voor in huis en beschouwt dit vooral een “Wageningse” zaak. Tegelijkertijd beseft het KNMI ook dat “Wageningen” geen routinematige waarnemingen uitvoert.
- Het afwegen en bekijken hoe en waar het meten van actuele verdamping wel kan worden vorm gegeven, is iets waar het KNMI zeker wil over meedenken.
- Indien er een brede vraag komt om over te stappen van Makkink naar Penman-Monteith wil het KNMI dit in principe zeker doen. Uiteraard moet hier dan brede consensus over bestaan en moet gekeken worden naar praktische aspecten als hoeveel stations en welke additionele metingen uitgevoerd moeten worden.
- Het KNMI wil graag meewerken aan een studie(mid)dag in het voorjaar 2009 om met een grotere groep over deze zaken te praten.

De in dit hoofdstuk naar voren gekomen punten die meegenomen moeten worden in de overweging tussen het gebruik van Penman-Monteith ten opzichte van Makkink kunnen worden samengevat tot:

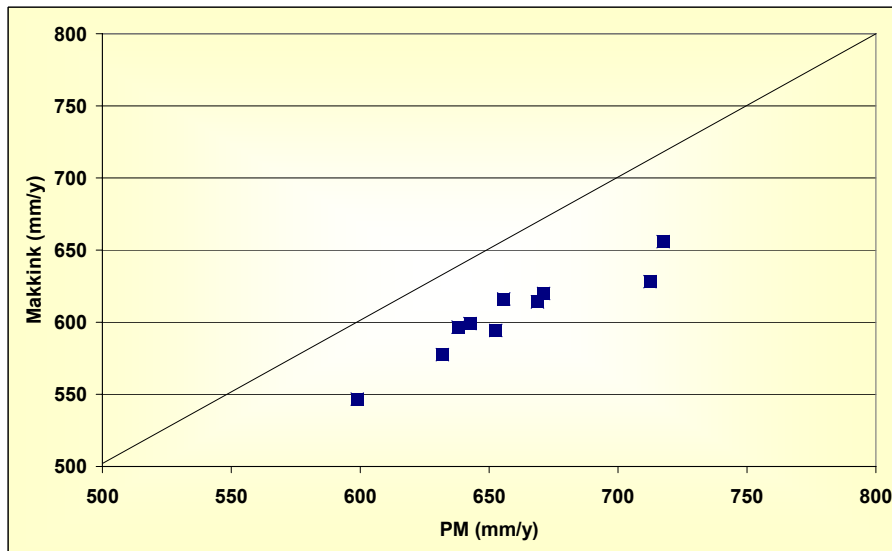
- Penman-Monteith is de meest deterministische (fysische) methode.
- In de wetenschappelijke literatuur wordt Penman-Monteith vaak als de nauwkeurigste methode beoordeeld.
- Gezien het fysische karakter van Penman-Monteith is deze geschikter om effecten van klimaatverandering te schatten.
- Internationaal is Penman-Monteith de meest toegepaste methode.





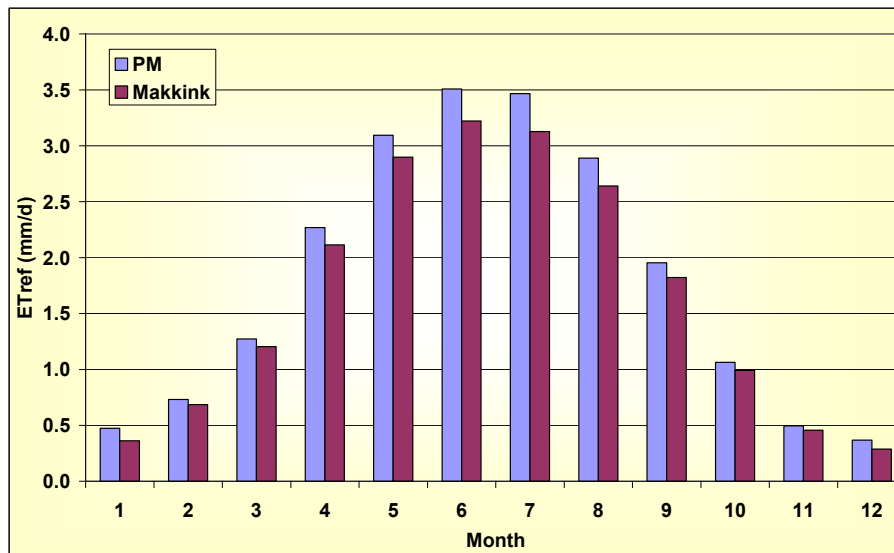


**Figuur 5. Dagelijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007).**

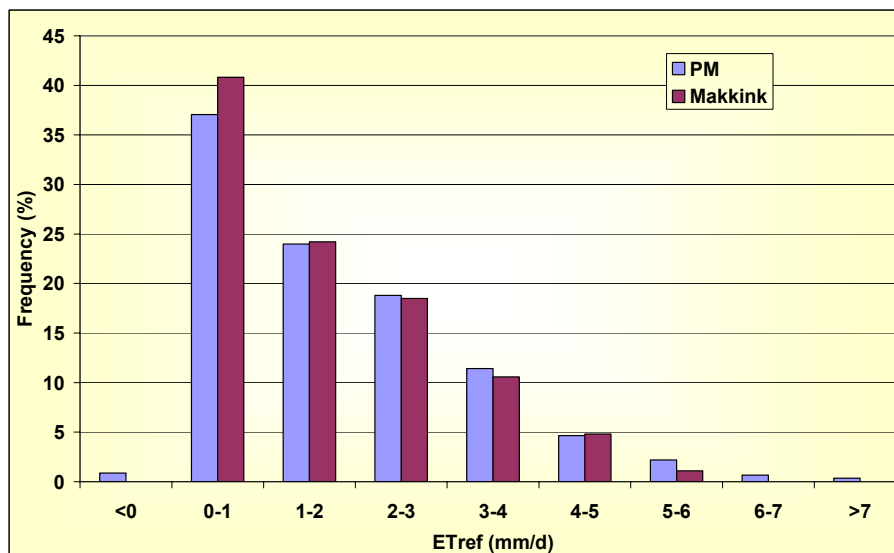


**Figuur 6. Jaarlijkse referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007).**





**Figuur 7. Maandelijks gemiddelde referentie verdamping (in mm per dag) volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007).**



**Figuur 8. Frequentie van gemiddelde referentie verdamping volgens Penman-Monteith en Makkink voor De Bilt (1998-2007).**

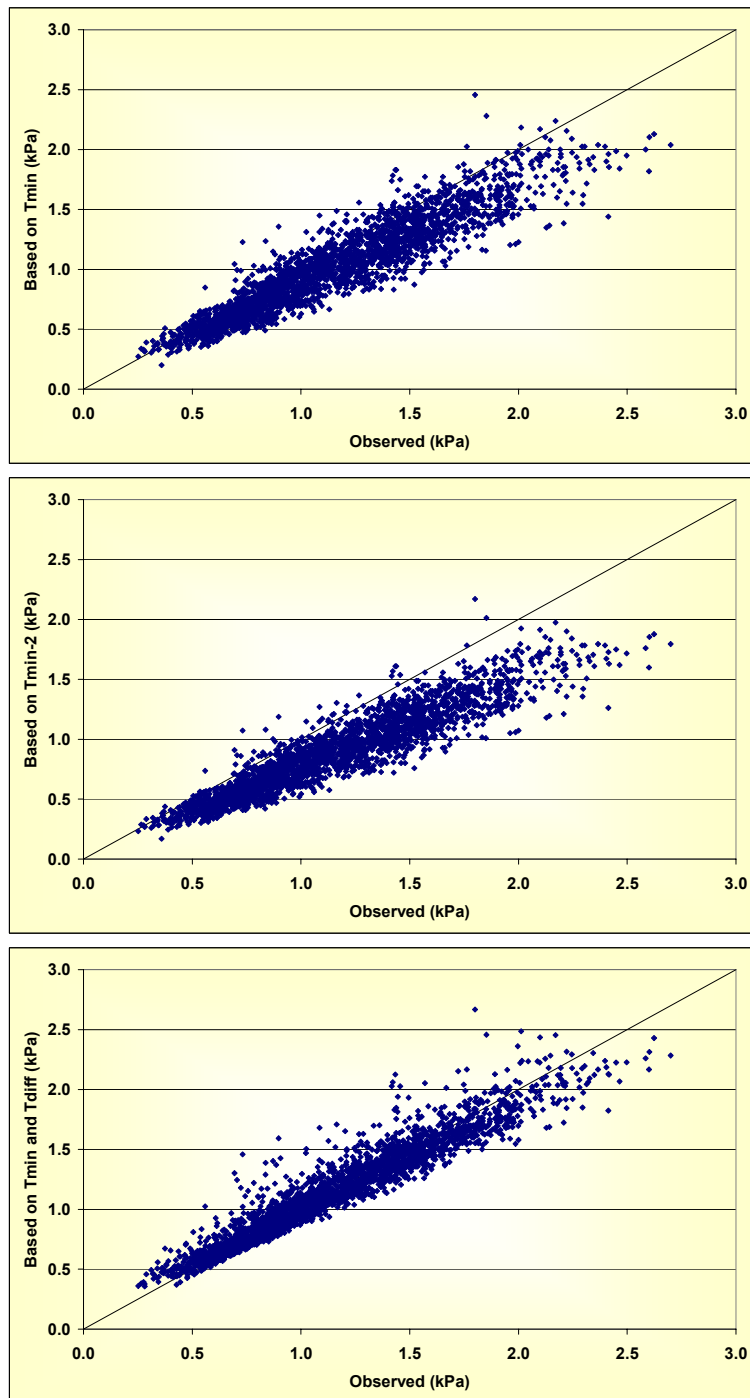
#### 2.2.4.3 Dampspanning

Een belangrijke parameter voor de toepassing Penman-Monteith is de dampspanning. Deze kan afgeleid worden van de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur, waarbij het aan te bevelen is om gebruik te maken van de minimale en de maximale waarden van een dag. Indien deze niet beschikbaar zijn, kan gebruik gemaakt worden van de gemiddelde voor een dag.

Vanaf 2001 levert het KNMI standaard de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid voor De Bilt. In de periode daarvoor of voor andere stations moet echter gebruik gemaakt worden van de benadering dat de minimale temperatuur gelijk is aan de dauwpunt temperatuur, welke weer gebruikt kan worden voor het bepalen van de dampspanning. Het is echter duidelijk dat de aanname dat de minimale temperatuur gebruikt kan worden als benadering van de dauwpunt



temperatuur foutgevoelig is en lokaal getest moet worden (Allen et al., 1998). Voor de periode 2001-2007 is getest of deze aanname correct is.



**Figuur 9. Schatting van de dampspanning gebaseerd op temperatuur. Boven: Tmin, midden: Tmin-2; onder: Tmin en Tdiff.**

Figuur 9 laat zien dat zowel de aanname dat de dampspanning kan worden geschat aan de hand van de minimale temperatuur (of de minimale temperatuur  $-2^{\circ}\text{C}$ ) niet juist is. Zowel de gemiddelde fout als de spreiding verschillen aanzienlijk. Er is daarom gekeken naar een andere mogelijke correctie en het blijkt dat vooral het temperatuurverschil tussen minimale en maximale temperatuur bepalend is. Na enig testen is de volgende vergelijking afgeleid voor het bepalen van de dampspanning indien deze niet gemeten is:



$$e_a = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) + (-0.0785 + 0.0247(T_{\max} - T_{\min}))$$

met

$e_a$  = dampspanning (kPa)

$T_{\min}$  = minimale dagtemperatuur (°C)

$T_{\max}$  = maximale dagtemperatuur (°C)

De eerste term van deze vergelijking is de standaard vergelijking voor het bepalen van de dampspanning (Allen et al., 1998), terwijl de tweede term een correctie is die is afgeleid aan de hand van zeven jaar gegevens voor De Bilt. Tabel 4 en Figuur 9 (onder) laten zien dat met deze vergelijking de dampspanning goed kan worden geschat. Deze vergelijking is in deze studie dan ook gebruikt voor de jaren waar geen relatieve luchtvochtigheid is gemeten (1998-2000).

Aanbeveling korte termijn

Bij het ontbreken van relatieve luchtvochtigheid gegevens kan de dampspanning goed geschat worden uit de minimale temperatuur en een correctie factor voor het dagelijkse temperatuurverschil.

**Tabel 4. Vergelijking van gemeten en berekende dampspanning voor De Bilt 2001-2007.**

Methoden	dampspanning (kPa)	R <sup>2</sup> met meting	afwijking gemiddeld
Gemeten	1.16	1.00	0.00
Tmin	1.02	0.87	0.13
Tmin-2	0.89	0.87	0.26
Tmax-Tmin correctie	1.16	0.92	0.00

#### 2.2.4.4 Robuustheid

Zoals eerder aangegeven heeft Makkink minder gegevens nodig dan Penman-Monteith. Daarnaast zijn de gegevens die voor Makkink nodig zijn veel ruimtelijk constanter in vergelijking tot de Penman-Monteith gegevens. Met andere woorden: de afwijking die Penman-Monteith geeft door gegevens van een andere locatie te gebruiken zou groter kunnen zijn dan bij het toepassen van Makkink.

In situaties waar metingen niet nauwkeurig worden uitgevoerd speelt een zelfde discussie (Droogers and Allen, 2001). De nauwkeurigheid waarmee meteorologisch metingen kunnen worden uitgevoerd zou ook meegenomen moeten worden in de afweging om Penman-Monteith of Makkink toe te passen. Voor Makkink zijn metingen nodig die minder foutgevoelig zijn dan de metingen die nodig zijn voor het toepassen van Penman-Monteith.

Zoals gezegd speelt het voor Nederland echter wel een rol dat metingen van een bepaald station worden gebruikt voor locaties die wel op tientallen kilometers verder kunnen liggen. Uiteraard zullen hier de omstandigheden anders zijn dan op de meetlocatie. De robuustheid van Penman-Monteith en Makkink is daarom getest door de verschillen in meetlocatie en de toepassingslocaties in te schatten en te analyseren wat de invloed is op de referentie verdamping voor de twee methoden. Hiervoor zijn wederom de daggegevens van De Bilt over de periode 1998-2007 gebruikt.



In Figuur 10 is voor Makkink gekeken hoeveel de referentie verdamping verandert indien de lokale omstandigheden afwijken van de meetlocatie. Voor Makkink zijn alleen verschillen in temperatuur en globale straling van belang. Een verschil in de temperatuur van 5 graden levert een verschil van 65 tot 70 mm referentie verdamping op. Een verschil van globale straling van 10% levert ook een verschil in referentie verdamping van zo'n 60 mm op. In theorie zouden deze twee elkaar kunnen opheffen, maar het is waarschijnlijker dat een locatie met een hogere globale straling ook een hogere temperatuur heeft. Zo geeft bijvoorbeeld een toename van de globale straling met 10% gecombineerd met een hogere gemiddelde temperatuur van 5°C een referentie verdamping die 132 mm hoger is.

Dezelfde analyse is uitgevoerd voor Penman-Monteith, gebruik makend van de vier belangrijkste meetgegevens: temperatuur, windsnelheid, dampspanning en netto straling. Uit Figuur 11 blijkt dat afwijkingen in de temperatuur slechts beperkte invloed hebben op de uiteindelijke referentie verdamping. De windsnelheid en vooral de dampspanning hebben echter een zeer grote invloed op de referentie verdamping volgens Penman-Monteith. Andere studies laten soms zien dat de temperatuur wel een belangrijke factor is voor de berekende Penman-Monteith (bijv. Beersma et al., 2004). Het verschil is dat in de resultaten zoals gepresenteerd in Figuur 11 alleen de directe gevoeligheid van de temperatuur is meegenomen: alleen de deler in de aerodynamische term van Penman-Monteith. Andere studies nemen mee dat de temperatuur ook de dampspanning beïnvloedt, terwijl dit in deze studie onafhankelijk is getest.

De lokale verschillen in de bovengenoemde metingen zijn van belang bij het trekken van conclusies op bovenstaande resultaten. Temperatuurverschillen zullen over het algemeen niet meer dan enkele graden bedragen binnen een straal van 10 tot 20 km. De globale straling zal veel minder lokale variatie laten zien. Op grond hiervan zal een referentie verdamping bepaald via Makkink geldig zijn voor locaties die verder verwijderd zijn dan waar de metingen hebben plaatsgevonden. Voor Penman-Monteith zijn de meest gevoelige parameters de windsnelheid en de dampspanning. Deze twee parameters kunnen lokaal verschillen en het is dan ook belangrijk om meetgegevens te gebruiken die de lokale situatie goed weergegeven.

Mogelijke opties om deze lokale verschillen te minimaliseren zijn: dichter netwerk van metingen, omzetten van gemeten parameters naar gewenste parameters of het toepassen van remote sensing. Hiervoor moet dan worden gekeken hoeveel de benodigde meetgegevens ruimtelijk afwijken en hoe groot het verschil kan zijn tussen meetlocatie en de locatie waarvoor de referentie verdamping nodig is. Met behulp van geostatistische methoden en remote sensing kan dit worden bepaald. Het uiteindelijke doel van een dergelijke analyse is om aanbevelingen te doen hoe de referentie verdamping geregionaliseerd kan worden.

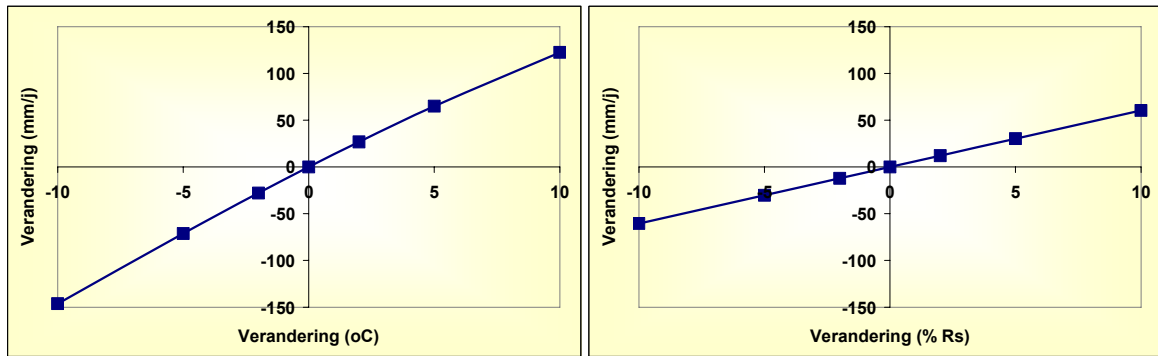
**Aanbeveling korte termijn**

Een controle van de representativiteit van de meetgegevens op de lokale situatie is noodzakelijk om een betrouwbare referentie verdamping te verkrijgen. Dit geldt vooral voor Penman-Monteith.

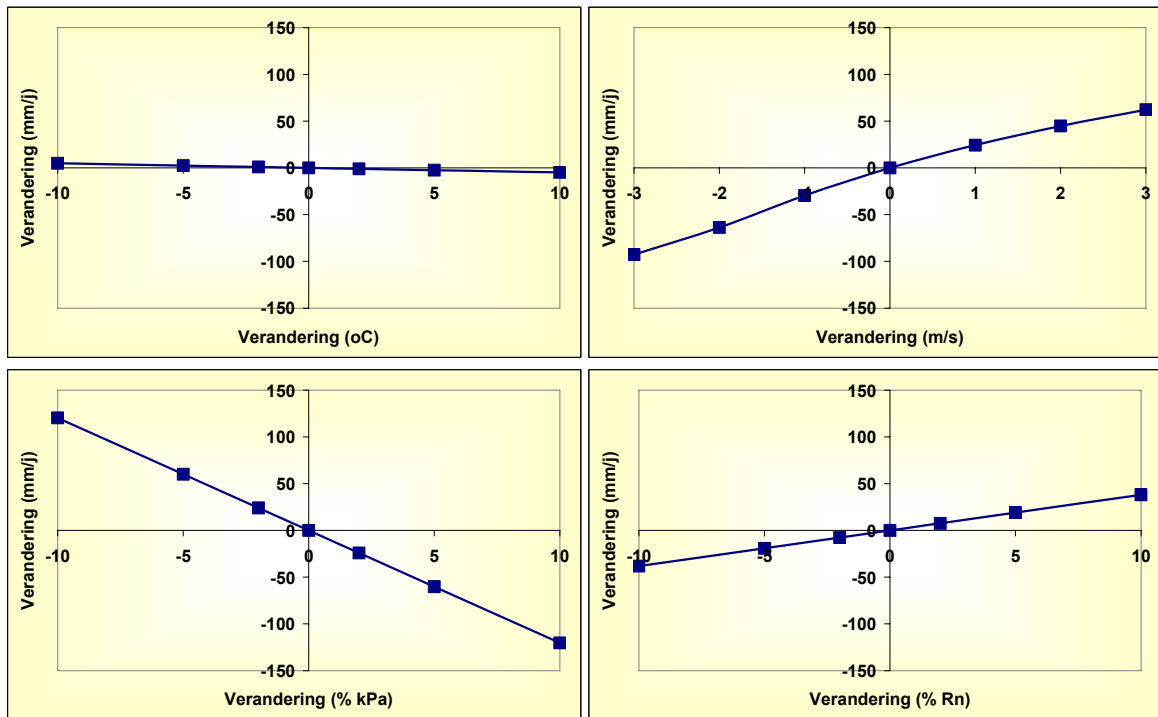
**Aanbeveling lange termijn**

Een uitgebreide analyse uitvoeren om te beoordelen in hoeverre afwijkingen van de lokale condities ten opzichte van de meetlocatie condities de bepaling van de referentie verdamping beïnvloeden.





Figuur 10. Invloed van verandering in gemiddelde temperatuur (links) en globale straling (rechts) op de Makkink referentie verdamping in mm per jaar.



Figuur 11. Invloed van verandering in temperatuur (links boven), wind (rechts boven), dampspanning (links onder) en netto straling (rechts onder) op de Penman-Monteith referentie verdamping in mm per jaar.



# 3 Metingen actuele verdamping

## 3.1 Meetmethoden

Er zijn een aantal methoden beschikbaar voor het meten van actuele verdamping, elk met zijn eigen voor- en nadelen. In dit hoofdstuk worden alleen die metingen behandeld die leiden tot de actuele verdamping; metingen die nodig zijn voor het bepalen van de referentie verdamping worden hier buiten beschouwing gelaten.

Er bestaan verschillende beschrijvingen van meetmethoden, elk met een specifieke indeling in categorieën (e.g. Moors, 2008; Katerji en Gianfranco, 2008; Allen et al., 1998). Vanuit het oogpunt van toepassingen in het waterbeheer kunnen de volgende technieken worden onderscheiden:

- Afgeleide metingen
  - Waterbalans
  - Bodemvocht
- Directe metingen
  - Lysimeters
  - Verdampingspan
  - Sap stroom
- Micro-meteorologisch metingen
  - Eddy-correlatie methode
  - Bowen-ratio methode
  - Flux profiel methode
  - Scintillometer
- Remote sensing methoden

De methoden zullen hieronder kort en bondig worden beschreven.

### 3.1.1 Waterbalans van een gebied

De waterbalans methode voor het bepalen van de actuele verdamping gaat ervan uit dat alle andere termen van de waterbalans bekend zijn en dat de actuele verdamping dus de ontbrekende term is:

*Actuele verdamping = neerslag + aanvoer – afvoer + kwel – wegzijging + verandering in waterberging*

Het succes van deze methode hangt dus volledig af van de nauwkeurigheid waarmee de andere componenten gemeten kunnen worden. Een onlangs afgesloten studie bij het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (Van Buren et al., 2008) liet zien dat de waterbalans een onnauwkeurigheid had van 20% voor de som van 15 deelgebieden, uitgedrukt als het verschil tussen totale instroom en totale uitstroom voor een geheel jaar. Afwijkingen per deelgebied of voor kortere periodes vielen soms hoger uit.

Ondanks de beperking van de nauwkeurigheid is de waterbalans methode voor grotere gebieden nog steeds een standaard toegepaste methode. Vaak wordt deze dan gebruikt in



combinatie met het beter begrijpen van de totale hydrologische situatie van het gebied, om zodoende de andere termen van de waterbalans ook beter te kunnen inschatten.

### 3.1.2 Bodemvocht

Actuele verdamping kan bepaald worden met behulp van bodemvochtmetingen. Veranderingen in bodemvocht over tijd geven dan een schatting van de actuele verdamping, indien andere parameters zoals neerslag, oppervlakkige afvoer, capillaire opstijging en drainage bekend zijn of niet optreden. De bodemvochtmetingen kunnen worden uitgevoerd met diverse apparatuur, maar de TDR (Time Domain Reflectometry) wordt gezien als de de-facto standaard.

### 3.1.3 Lysimeters

Het uitgangspunt van lysimeters is het wegen van veranderingen in een uitgegraven ongestoord bodemprofiel. De actuele verdamping wordt vervolgens berekend als het verschil tussen opeenvolgende wegingen van de lysimeter en moet eventueel worden gecorrigeerd voor neerslag en drainage indien aanwezig. Lysimeters worden gezien als de meest betrouwbare metingen van actuele verdamping op puntschaal, maar zijn ook erg kostbaar en hebben betrekking op een relatief klein oppervlak.

Gezien het feit dat lysimeters beschouwd worden als de meest betrouwbare methode voor het meten van actuele verdamping, is het verrassend dat in Nederland momenteel geen enkele lysimeters operationeel is. Het inzetten van lysimeters om actuele verdamping voor gebruik in het operationele waterbeheer is niet haalbaar, omdat dan voor vele combinaties van bodem en gewas een lysimeter nodig zou zijn. Gezien het belang van het beter inschatten van actuele verdamping is het aan te bevelen om enkele lysimeters op te zetten, om zodoende het onderzoek naar verdampingsmethoden te versterken.

#### Aanbeveling lange termijn

Lysimeter metingen starten in Nederland om het onderzoek naar actuele verdamping te verbeteren om zodoende tot nauwkeurigere methoden voor het waterbeheer te ontwikkelen.

### 3.1.4 Verdampingspan

Wereldwijd is de verdampingspan de meest toegepaste methode om verdamping te bepalen. De verkregen pan-verdamping hoeft echter geen relatie met de actuele verdamping te hebben, maar kan wel gebruikt worden om de referentie verdamping te bepalen.

### 3.1.5 Sapstroom metingen

Sapstroom metingen worden vooral toegepast op bomen en struiken. Een tweetal methoden worden toegepast: thermische dissipatie (TDP) en stam warmtebalans (SHB). Beide technieken zijn in staat om de hoeveelheid water die door een boom stroomt te bepalen, wat een directe maat voor de verdamping is.

### 3.1.6 Eddy-correlatie methode

De micro-meteorologisch methoden zijn gebaseerd op het meten van waterdamp fluxen in de lucht en zijn dus een directe maat van de actuele verdamping. De eddy-correlatie methode





wordt beschouwd als de meest directe micro-meteorologisch meetmethode, omdat deze, in tegenstelling tot de andere methoden, niet gebaseerd is op het oplossen van de energiebalans. De eddy-correlatie methode wordt tegenwoordig dan ook beschouwd als de standaardmethode voor het meten van de actuele verdamping op veldschaal.

De methode is gebaseerd op het meten van de fluctuaties van de verticale windsnelheid en de fluctuaties van de dampspanning. De naam van de methode is afkomstig van de (kleine) roterende luchtstromingen (eddies). De meetinstrumenten voor de eddy-correlatie methode bestaan uit een drie-dimensionele windsnelheidmeter (anemometer) en een dampspanningmeter. Essentieel van deze instrumenten is dat de snelheid van metingen hoog moet zijn, vaak in de orde van 10 tot 20 Hz (10-20 metingen per seconde).

De eddy-correlatie methode is, evenals alle andere micro-meteorologisch methoden, een puntwaarneming. Deze puntwaarneming is echter geldig voor een gebied dat bovenwinds ligt van het meetpunt. De grootte van dit gebied (de footprint) kan worden berekend uit de windsnelheid (meer precies: het logaritmische windprofiel) en de ruwheidslengte van het gebied. Als vuistregel wordt vaak aangenomen dat een afstand van 100 maal de hoogte van de mast boven de vegetatie wordt bemeten. Een mast die dus 5 meter boven de vegetatie staat, zal de verdamping van een gebied van ongeveer 500 meter bovenwinds meten.

Uit de Eddy-correlatie methode volgt de verdampingsflux (latent heat flux). Om deze om te zetten in mm verdamping wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = LE \cdot 0.035$$

met

ET = verdamping (mm d<sup>-1</sup>)

LE = verdampingsflux (W m<sup>-2</sup>)

λ = verdampingswarmte van water (2.45·10<sup>6</sup> J kg<sup>-1</sup>)

Er bestaat een grote hoeveelheid wetenschappelijk literatuur over de eddy-correlatie methode; een goede samenvatting is gegeven door Moors (2008).

### 3.1.7 Bowen-ratio methode

The Bowen-ratio methode is gebaseerd op het meten van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid op twee hoogten. Het verschil in temperatuur gedeeld door het verschil in luchtvochtigheid op de twee hoogten wordt de Bowen-ratio genoemd. Door dit te combineren met de standaard energiebalans vergelijking, kan vervolgens een schatting van de verdamping worden verkregen. Hierbij is dan nog wel de netto straling en de bodemwarmteflux nodig, waarbij de laatste vaak op nul wordt verondersteld.

De Bowen-ratio heeft een aantal nadelen, waardoor deze niet veel meer wordt toegepast: meten van kleine verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid, goede meting van netto straling, zeer onnauwkeurig 's nacht en rondom zonsopkomst en ondergang.

### 3.1.8 Flux-profiel methode

De flux-profiel methode lijkt op de Bowen-ratio methode, omdat deze ook gebaseerd is op het meten van gradiënten. Bij de flux-profiel methode wordt echter ook de wind gemeten en wordt



ervan uitgegaan dat de gradient in luchtvochtigheid, gecombineerd met de windsnelheid omgerekend kan worden tot de actuele verdamping. Het grote voordeel van de flux-profiel methode is dat de netto straling niet gemeten hoeft te worden, en dat de methode dus een directere schatting van de actuele verdamping geeft. Aangezien de methode ook gebruik maakt van gradiënten op verschillende hoogten, is de nauwkeurigheid niet altijd hoog en is de methode niet geschikt voor kleinere verdampingsfluxen (natte omstandigheden, 's nachts, zonsopkomst en ondergang).

### 3.1.9 Scintillometer

De meeste micro-meteorologisch meetmethoden bepalen de actuele verdamping voor een punt. De scintillometer levert echter gemiddelde gegevens van de verdamping en warmtestromen over een gebied van enkele vierkante kilometers.

De scintillometer, vaak ook LAS (Large Aperture Scintillometer) genoemd, bestaat uit een lichtbron en een detector. Het apparaat meet de variaties van het lichtsignaal nadat de lichtbundel door de turbulente atmosfeer is gegaan. De afstand tussen de lichtbron en de detector kan variëren tussen één en tien kilometer. De grootte van de luchttrillingen worden uitgedrukt in de structuurparameter  $C_n$  van de refractieve index  $n$  van lucht. Uit  $C_n$  kan de voelbare warmteflux en de dwarswind worden berekend. Gebruik makend van de standaard vergelijking voor de energiebalans en uitgaande dat de bodemwarmteflux verwaarloosbaar is en een schatting of meting van de netto straling, kan dan de actuele verdamping worden bepaald.

### 3.1.10 Remote Sensing methoden

De afgelopen jaren zijn er diverse methoden ontwikkeld voor het bepalen van de actuele verdamping uit satelliet (remote sensing) beelden.

SEBAL is de afkorting voor Surface Energy Balance algoritme for Land. Een summier beschrijving van de SEBAL methode zal hieronder worden gegeven, waarbij alleen de algemene principes en uitgangspunten worden genoemd. Een uitgebreidere samenvattende beschrijving in het Nederlands van SEBAL is te vinden in Stromingen van 2003 (Bastiaanssen en Roozkrans, 2003). Voor de wetenschappelijke beschrijving en meer achtergrond wordt verwezen naar Bastiaanssen et al., (1998).

SEBAL is gebaseerd op de wetmatigheid dat natte en donkere oppervlaktes veel straling absorberen en weinig reflecteren. Een hoge absorptie leidt tot relatief veel energie beschikbaar voor het opwarmen van de atmosferische grenslaag en voor verdamping. Donkere oppervlaktes kunnen dus potentieel meer water verdampen dan lichte oppervlaktes. Satellieten meten ook thermisch-infrarode straling waarmee de warmte-uitstraling van het landoppervlak wordt vastgelegd. Een nat oppervlak heeft een hoge verdamping en is daardoor koel; een droog oppervlak heeft een lage verdamping en is daardoor warm. De oppervlaktetemperatuur is daarmee een indirecte maat voor de actuele verdamping.

Via de relatief complexe rekentechniek SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) wordt de straling zoals gemeten door satelliet sensoren omgezet naar energie fluxen. De volgende drie satellieten worden het meest gebruikt voor SEBAL: NOAA-AVHRR, Landsat, MODIS. Van belang is dat de satellieten thermisch infrarood meten. Met SEBAL worden de



verschillende termen van de oppervlakte energiebalans gekwantificeerd op basis van stralingsmetingen.

Eén van de grote voordelen van de SEBAL methode is dat er geen specifieke bodem en landeigenschappen bekend hoeven te zijn, omdat het model via stralingsinteracties wordt aangestuurd. Omdat  $R_n$ ,  $G$  en  $H$  gebaseerd zijn op spectrale straling (en niet op terrein eigenschappen), betekent dit voor de praktijk dat voor iedere vorm van landgebruik (dus ook voor bossen en natuurterreinen), de actuele verdamping kan worden afgeleid uit remote sensing metingen. Ook voor pixels met een heteroog landgebruik kan de verdamping worden uitgerekend.

De SEBAL energiebalans berekeningen kunnen alleen worden uitgevoerd als de satelliet-beelden onbewolkt zijn. Voor bewolkte dagen wordt de oppervlakteweerstand ( $r_s$ ) van onbewolkte dagen gebruikt om de verdamping te kwantificeren. Door de inversie van de Penman-Monteith vergelijking kan  $r_s$  voor onbewolkte dagen en voor elke pixel worden uitgerekend (SEBAL levert immers  $\lambda E$  aan). Met kennis van  $r_s$  voor elke pixel kan op bewolkte dagen toch een schatting van verdamping worden gemaakt door de Penman-Monteith vergelijking met actuele meteorologische invoer gegevens te voeden.

Naast de SEBAL methode bestaan er enkele andere methoden gebaseerd op remote sensing, gebruik makend van dezelfde principes. Enkele vaak toegepaste methodes zijn SEBS, ETLook en METRIC. Een vergelijk van de verschillende methodes is elders te vinden (Kite en Droogers, 2000). Deze energiebalans methoden worden gezien als betrouwbaarder in vergelijking met de meer parameter gebaseerde methoden, maar tegelijkertijd ook complexer.

In Figuur 13 is een voorbeeld te zien van de toepassing van SEBAL voor het bepalen van de actuele verdamping voor heel Nederland. Duidelijk is te zien dat door droogte in het begin van 2007 de actuele verdamping relatief laag is. In Figuur 12 is een voorbeeld te zien van de toepassing van remote sensing voor boeren via de site [www.mijnakker.nl](http://www.mijnakker.nl).

Het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft wekelijkse SEBAL gegevens voor 1995, 1998, 1999 en 2000. Deze gegevens worden gebruikt voor het gedetailleerd analyseren van de waterbalansen om zodoende beter strategische beslissingen op het gebied van waterbeheer te nemen. Als voorbeeld zijn voor twee weken in 1995 deze gebiedsdekkende kaarten van actuele verdamping te zien (Figuur 14). Duidelijk is dat in week 24 (12-18 juni) de actuele verdamping lager was dan in week 26 (26-juni / 2-juli). Dit soort kaarten kunnen gevalideerd worden indien metingen met actuele verdamping beschikbaar zijn. Voor deze twee weken is de remote sensing pixel waarin Cabauw valt, vergeleken met de metingen van Cabauw:

- gemiddelde week 24
  - remote sensing: 2.4 mm d<sup>-1</sup>
  - Cabauw: 2.6 mm d<sup>-1</sup>
- gemiddelde week 26
  - remote sensing: 4.5 mm d<sup>-1</sup>
  - Cabauw: 5.3 mm d<sup>-1</sup>

Bij deze vergelijking moet wel rekening gehouden worden dat de remote sensing een gemiddelde geeft van een pixel van 1 x 1 km<sup>2</sup>, terwijl de resultaten van de Cabauw metingen een gemiddelde geven van een gebied dat afhankelijk is van de windrichting en windsnelheid. Een nadere analyse, rekening houdend met deze aspecten, zou wenselijk zijn.



Voor de jaren 1995, 1998, 1999 en 2000 zijn ook voor de andere weken (week 14 = 3 april tot en met week 39 = 25 september) in het groeiseizoen SEBAL actuele verdampingsgegevens beschikbaar. Figuur 15 laat voor het punt waar Cabauw zich bevindt de wekelijkse actuele verdamping en de cumulatieve waarden zien. Voor 1998, en in mindere mate voor 2000, is duidelijk waar te nemen dat de actuele verdamping in de zomer achter blijft door vochttekort. De cumulatieve actuele verdamping over 1998 is dan ook het laagst voor het gehele jaar, maar doordat in het voorjaar de actuele verdamping relatief hoog was is de jaarlijkse verdamping toch weer niet extreem laag.

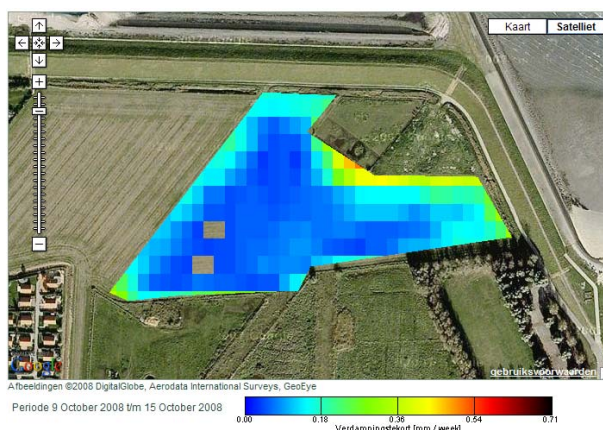
Voor het jaar 1995 zijn ook gegevens van actuele verdamping beschikbaar van de Eddy Correlatie metingen bij Cabauw beschikbaar. Deze zijn vergeleken met de SEBAL resultaten (Figuur 16). Aangezien de metingen van de Eddy Correlatie beïnvloedt worden door de windrichting, zijn van de pixels die direct naast Cabauw liggen (acht stuks) ook de minimale en maximale waarden geplot. In de Figuur is te zien dat de SEBAL en de Eddy Correlatie metingen redelijk goed overeenkomen. De grootste afwijkingen zijn te vinden in de wat drogere (lagere actuele verdamping) situaties, waarbij SEBAL lagere waarden laat zien dan Cabauw. Het is aan te bevelen om nadere analyses te doen waarbij verklaringen worden gezocht door onder andere te kijken naar windrichting, bewolking, luchtvochtigheid en vegetatie.

Voor de jaren 1998, 1999 en 2000 zijn (nog) geen meetgegevens voor Cabauw beschikbaar en daarom zijn alleen de SEBAL metingen weergegeven (Figuur 17). Interessant is dat de spreiding in de 1998 metingen rondom Cabauw zeer klein was. In dit droge jaar wordt blijkbaar de vochtvoorziening voor het gewas bepaald door de capillaire werking van de bodem, die waarschijnlijk redelijk constant is in het gebied. Voor de minder droge jaren is de spreiding groter wat verklaard zou kunnen worden door de dominantie van de gewaastoeestand waar vaak aanzienlijke spreiding in kan voorkomen. Nadere analyses zouden dit kunnen bevestigen.

Tenslotte wordt er nogmaals op gewezen dat de kracht van remote sensing bepaalde actuele verdamping vooral ligt in de grote ruimtelijke dekking die behaald kan worden.

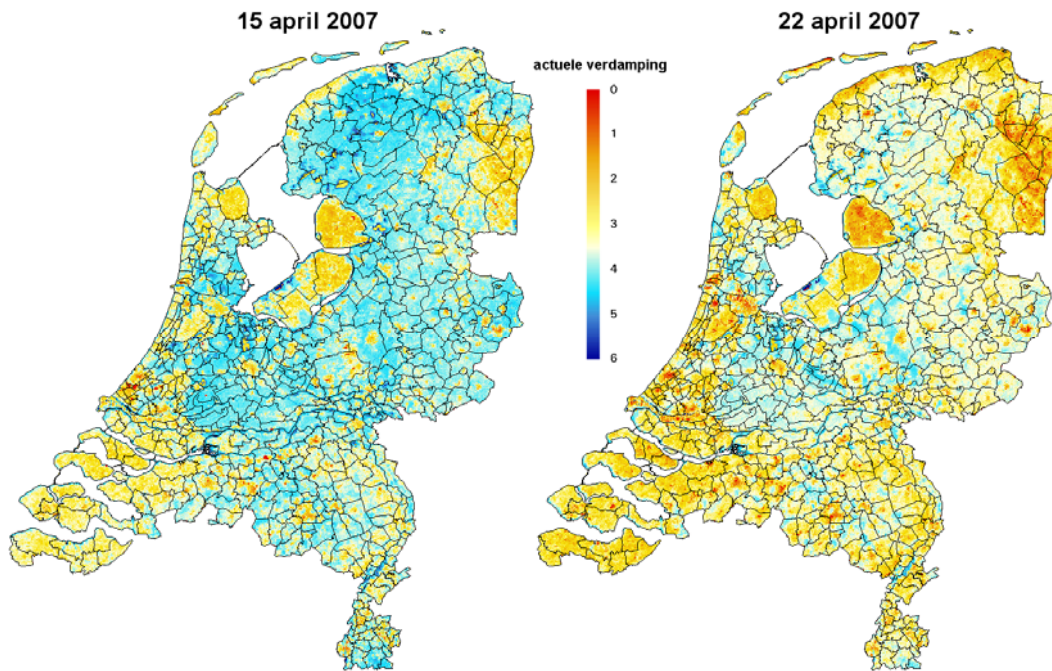
#### Aanbeveling korte termijn

Voor metingen van actuele verdamping over grotere gebieden is remote sensing vanwege de grote ruimtelijke variabiliteit uitermate geschikt. Een praktijk studie waarbij dagelijks vlakdekkende actuele verdamping wordt aangeleverd, zou inzicht kunnen geven over de meerwaarde hiervan voor waterbeheerders.

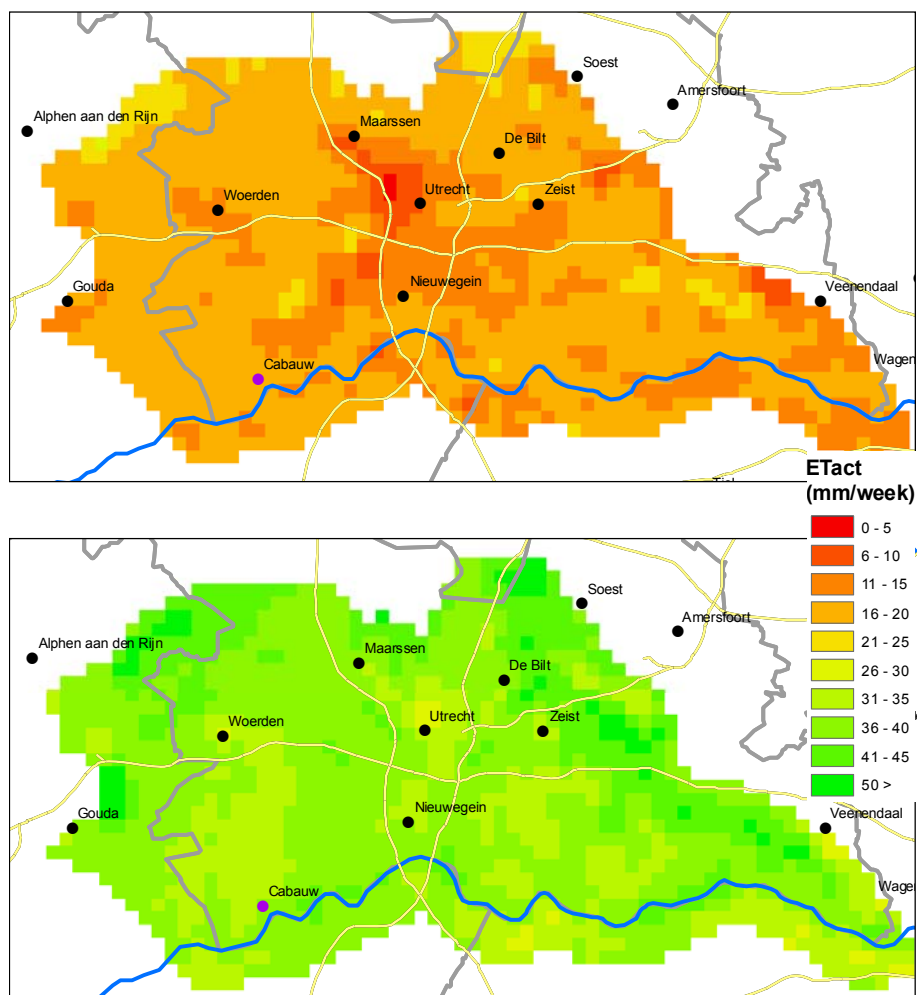


**Figuur 12. Voorbeeld van remote sensing actuele verdampingstekort waarnemingen (bron: [www.mijnakker.nl](http://www.mijnakker.nl)).**



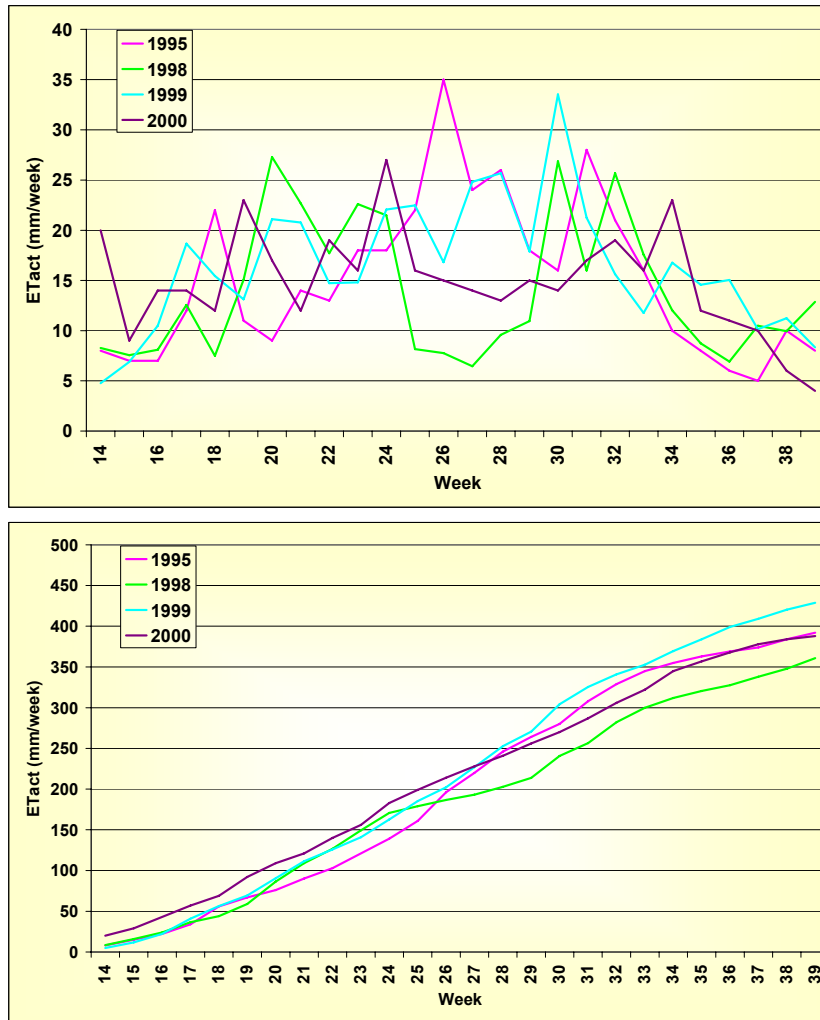


Figuur 13. Voorbeeld van remote sensing actuele verdamping waarnemingen voor 2007 (bron: [www.waterwatch.nl](http://www.waterwatch.nl) ).

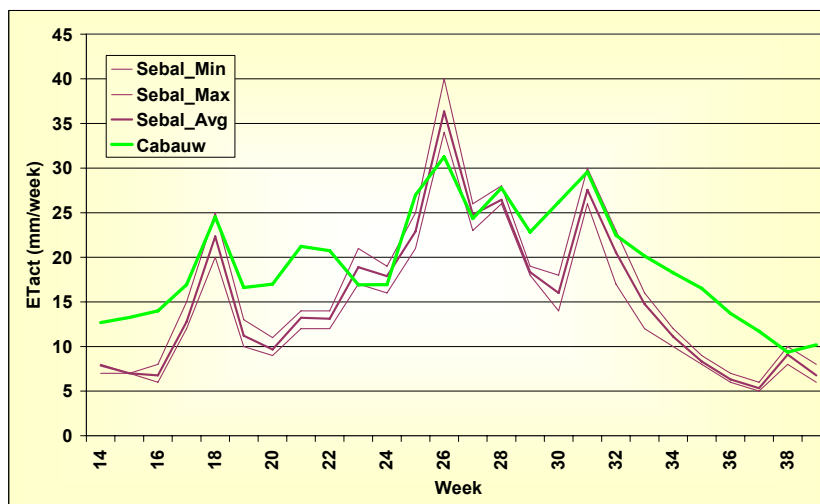


Figuur 14. Actuele verdamping voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor week 24 (boven) en week 26 (onder) van 1995.



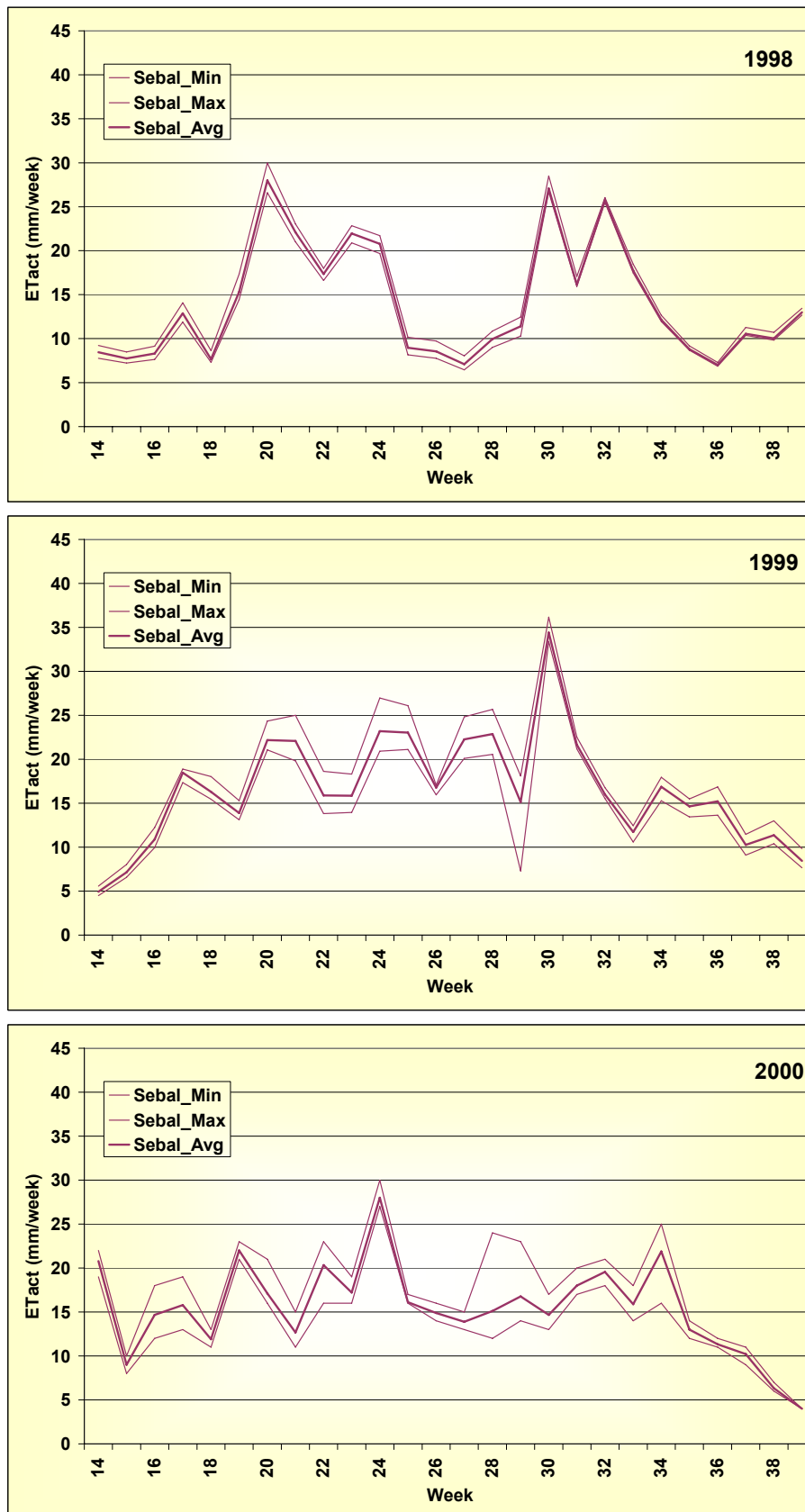


**Figuur 15. Actuele verdamping voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt (boven: wekelijkse, onder: cumulatieve).**



**Figuur 16. Actuele verdamping bepaald met SEBAL voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt voor 1995.**





Figuur 17. Actuele verdamping bepaald met SEBAL voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor het punt waar de meetmast Cabauw in ligt voor de jaren 1998 (boven), 1999 (midden) en 2000 (onder).



### 3.2 Inventarisatie metingen

Er is een inventarisatie uitgevoerd met als doelstelling een overzicht te krijgen van alle metingen van actuele verdamping die zijn uitgevoerd. Een aantal mensen en instituten zijn benaderd (Tabel 5) met als resultaat een lijst van 35 metingen die over de afgelopen jaren zijn uitgevoerd. Een complicerende factor tijdens de inventarisatie was het onderscheid tussen langdurige meetcampagnes en metingen die waren uitgevoerd voor een bepaald kortdurend project.

Voor elke meting is ook beschikbaarheid van de gegevens geïnventariseerd. De volgende categorieën worden onderscheiden:

- beschikbaar, ontvangen
- beschikbaar, nog niet ontvangen
- niet beschikbaar, alleen via de betreffende onderzoeker
- niet beschikbaar, onbetrouwbaar

Nagenoeg alle metingen werden door de verantwoordelijke voor deze gegevens in de derde categorie ingedeeld: niet beschikbaar, alleen via de betreffende onderzoeker. In enkele gevallen waren de metingen niet beschikbaar omdat de betreffende onderzoeker hier eerst zelf nog over moest publiceren. Voor verreweg alle andere metingen werden argumenten gebruikt die samengevat kunnen worden tot dat er “bij de metingen een verhaal hoort”. Daarnaast werd bij bijna alle metingen aangegeven dat deze nog moesten worden “opgeschoond” voordat ze gebruikt konden worden. Dit hangt samen met het feit dat een groot aantal recentere metingen gericht zijn op het meten van CO<sub>2</sub> fluxen. Bij deze metingen worden waterdamp fluxen wel automatische gemeten, maar niet geanalyseerd.

De volgende opmerkingen werden aangevoerd door de diverse personen verantwoordelijk voor de metingen:

- De resultaten van de metingen zijn nog niet gepubliceerd in de wetenschappelijke literatuur en kunnen dus nog niet worden gebruikt.
- De gegevens zijn nog te onbetrouwbaar om al vrij te geven. Een kwaliteitscontrole zal eerst moeten plaatsvinden.
- Het heeft drie mensmaanden gekost om de gegevens van één jaar van het meteo veld in Wageningen op te schonen (Duineveld, 2008).
- Eddy-correlatie metingen zijn onbetrouwbaar gedurende zonsopkomst, zonsondergang en tijdens neerslag.
- De metingen zijn zo specifiek voor de betreffende locatie dat deze niet algemeen kunnen worden toegepast.
- De metingen zijn uitgevoerd met een wetenschappelijke doelstelling en niet om algemeen te verspreiden en in een database op te nemen.

Uiteindelijk zijn er voor zes locaties voor één of meerdere jaren gegevens verkregen die beschikbaar waren. Deze gegevens zijn opgenomen in de database behorende bij dit rapport. Het gaat hier om de volgende locaties en jaren:

<i>Locatie</i>	<i>Vegetatie</i>	<i>Start</i>	<i>End</i>
Cabauw	gras	1986	2005
Kootwijk	naaldboom	1996	2003





Haastrecht	gras	2003	2004
Langerak	maïs	2005	2006
Zegveld	gras	2001	2002
Purmerend	bos	1991	2000

Verreweg de meeste metingen worden uitgevoerd door Alterra, Centrum Water en Klimaat. Alterra heeft een aantal van hun metingen verspreid op de internetsite van DataEurope (2008). Metingen, achtergrond en datasets zijn hier vrij te downloaden. Voor Nederland zijn 13 stations opgenomen in de dataset, maar hiervan zijn slechts twee stations die respectievelijk één jaar en acht jaar aan gegevens bevatten. Eén van de grote problemen met deze datasets is dat er vaak ontbrekende meetgegevens zijn. De ontwikkeling naar gestandaardiseerde “gap filling” methode begint echter vorm te krijgen (e.g. Falge et al., 2001). Om de overige metingen op te schonen en geschikt te maken voor algemeen gebruik, zijn ongeveer 100 mensdagen nodig. Als resultaat zullen dan ongeveer 25 meetjaren (= stations x jaren) beschikbaar komen.

De algemene conclusie uit de inventarisatie is dat actuele verdamping metingen nog niet kunnen worden beschouwd als standaard metingen zoals neerslag en temperatuur. De achtergrond hiervan is dat neerslag en temperatuur niet of weinig beïnvloed worden door het lokale grondgebruik en actuele verdamping wel.

Uit de inventarisatie kwam ook duidelijk naar voren dat er binnen Nederland niemand verantwoordelijk is voor het routinematig meten of verzamelen van metingen van actuele verdamping. Het KNMI beschouwt dit meer als een taak die thuis hoort in Wageningen. Alterra voert deze metingen echter uit in het kader van onderzoek. De WUR en andere universiteiten doen deze metingen alleen in het kader van wetenschappelijk onderzoek om verdampingprocessen beter te begrijpen. Momenteel is er één aanbieder die deze gegevens op een hoge ruimtelijke resolutie aanlevert: WaterWatch in Wageningen. Deze gegevens worden echter niet routinematig door regionale waterbeheerders gebruikt. Het zou wenselijk zijn om een brede discussie te starten of er één organisatie verantwoordelijk kan zijn voor het routinematig verzamelen, opslaan en verspreiden van actuele verdampingsgegevens voor regionale waterbeheerders

Aanbeveling lange termijn

Het opschonen van actuele verdamping metingen uitgevoerd door Alterra om zodoende een database te ontwikkelen die direct klaar is voor gebruik voor waterbeheerders.

Aanbeveling lange termijn

Evalueren of er binnen Nederland één organisatie verantwoordelijk kan worden voor het routinematig meten of metingen verzamelen op het gebied van actuele verdamping.



**Tabel 5. Geraadpleegde personen voor de inventarisatie van metingen van actuele verdamping.**

<b>Naam</b>	<b>Organisatie</b>
Jan Elbers	Alterra
Eddy Moors	Alterra
Joop Kroes	Alterra
Piet Warmerdam	WUR: hydrologie
Han Stricker	WUR: hydrologie
Bert Heusinkveld	WUR: meteorologie
Han Dolman	VU: aardwetenschappen
Dimmie Hendriks	VU: aardwetenschappen
Rolf Neubert	RUG: isotopenonderzoek
Jos van Dam	WUR: Bodemnatuurkunde
Fred Bosveld	KNMI
Jules Beersma	KNMI
Adri Buishand	KNMI

**Tabel 6. Overzicht metingen. Voor details zie Appendix 1**

<b>Naam</b>	<b>Locatie</b>	<b>Beheerder</b>
Cabauw	Lopik	Alterra/KNMI
Castricum	Castricum	
Dijkgraaf	Wageningen	Alterra
Ede	Ede	Alterra
Engberdijksvenen		WUR
Fleditebos	Zeewolde	Alterra
Fochtelooerveen	Veenhuizen	WUR: Meteorologie
Garderen	Garderen	ITC
Garderen		KNMI
Haarweg	Wageningen	WUR: Meteorologie
Haarweg	Wageningen	WUR: Meteorologie
Haastrecht	Haastrecht	Alterra
Horstermeer	Nederhorst den Berg	VU
Hupsel	Groenlo	
Kampina	Boxtel	Alterra
Langbroekerwetering		Alterra
Langerak		Alterra
Langeweg		Alterra
Lelystad	Lelystad	ECN
Loobos	Kootwijk	Alterra
Lutjewad		Alterra
Lutjewad	Noord Groningen	WUR: Meteorologie
Lutjewad	Noord Groningen	RUG
Maas-Waal	Batenburg-Leur	WUR: Meteorologie
Molenweg		Alterra
Oukoop	Reeuwijk	WUR: Nature conservation & Plant Ecology Group
Purmerbos	Purmerend	Alterra
Slotervaart	Den Helder	Alterra
Speuld	Garderen	WUR: Meteorologie
Stein	Reeuwijk	WUR: Nature conservation & Plant Ecology Group
Utercht	Utrecht	HDSR
Veenhuizen		Alterra
Vredepeel		Alterra
Zeewolde	Zeewolde	Alterra
Zegveld	Zegveld	Alterra



### 3.3 Vergelijk metingen

In de voorgaande paragraaf is beschreven dat het aantal gegevens betreffende actuele verdamping dat werkelijk en direct beschikbaar is, zeer beperkt is tot slechts enkele locaties. Een uitgebreide analyse waaruit duidelijke conclusies vallen te trekken is dan ook niet te maken. Een eerste aanzet is hier wel gegeven in Figuur 18 tot en met Figuur 19. Op grond hiervan zijn wel enkele conclusies te trekken, maar deze moeten vooral gezien worden als een eerste aanzet indien meer gegevens beschikbaar komen.

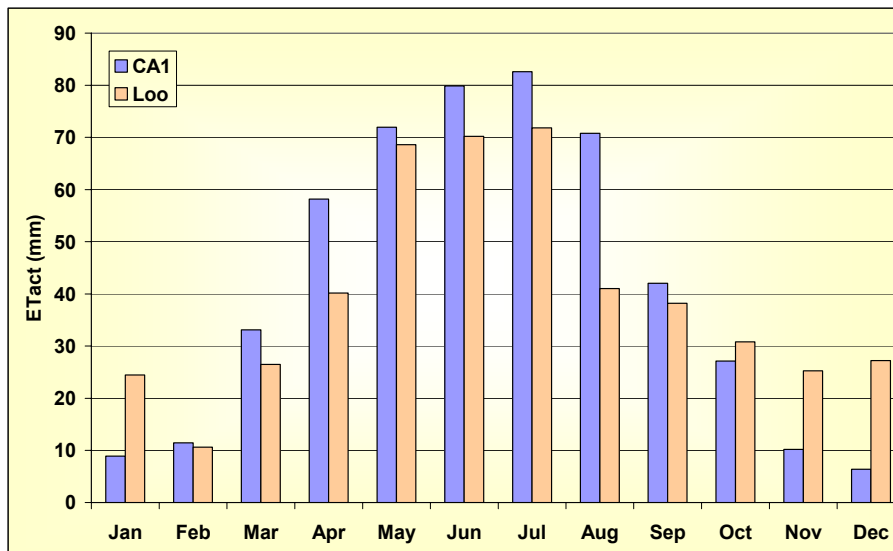
- *Jaarlijkse actuele verdamping Cabauw is iets hoger dan die van Loobos in 2003.* Gras (503 mm) verdampt iets meer dan het naaldbos (475 mm). Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door de zomer, waarbij het naaldbos duidelijk achter blijft. Dit komt waarschijnlijk door het grote vochttekort in de bodem gedurende de droge zomer van 2003 van de zandige bodem in het Loobos.
- *De actuele verdamping voor Loobos is meestal 80 tot 90% van de referentie verdamping volgens Penman-Monteith.* Voor de jaren 1999 tot en met 2002 is deze 80 to 90% geldig. Voor het jaar 1998 wijkt dit duidelijk af, waar mogelijk de verdampingsreductie door natte omstandigheden een rol heeft gespeeld. Voor 2003 is waarschijnlijk droogtereductie een verklaring.
- *Voor Cabauw (gras) is de actuele verdamping altijd lager dan de referentie verdamping.* De verhouding actuele verdamping over referentie verdamping (Penman-Monteith) lag in de droge zomer van 2003 gemiddeld rond de 70%. Indien uitgegaan wordt van Makkink ligt dit op ongeveer 80%.
- *Actuele verdamping van Loobos kan hoger zijn dan de referentie verdamping.* In de wintermaanden kan de actuele verdamping van het bos het dubbele bedragen van de referentie verdamping. Een gedeelte kan verklaard worden uit de hogere LAI van bos ten opzichte van het standaardgewas. Een andere verklaring kan de interceptie verdamping zijn die niet wordt meegenomen in de referentie verdamping.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op de vergelijking van de referentie verdamping en de actuele verdamping. Een zelfde vergelijking zou gemaakt kunnen worden voor de potentiële verdamping (= referentie verdamping vermenigvuldigt met de gewas factor, zie Hoofdstuk 2), maar ook dan zou de actuele verdamping nog steeds hoger zijn dan de potentiële verdamping.

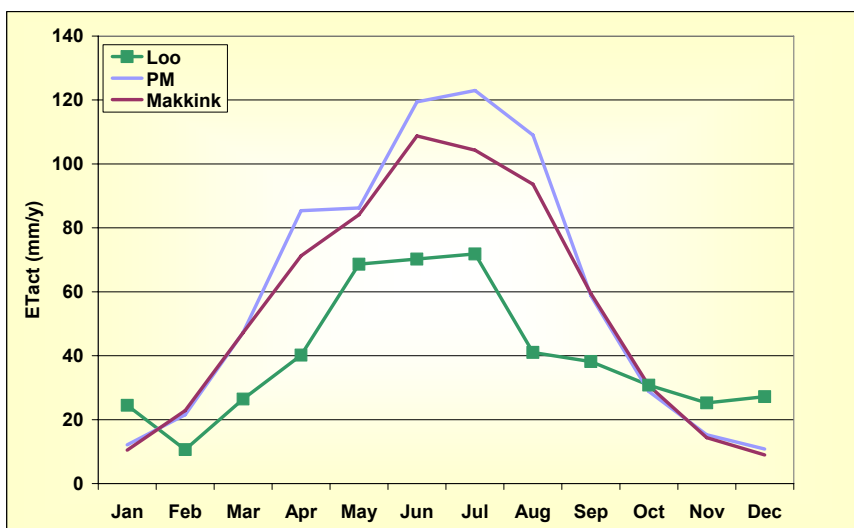
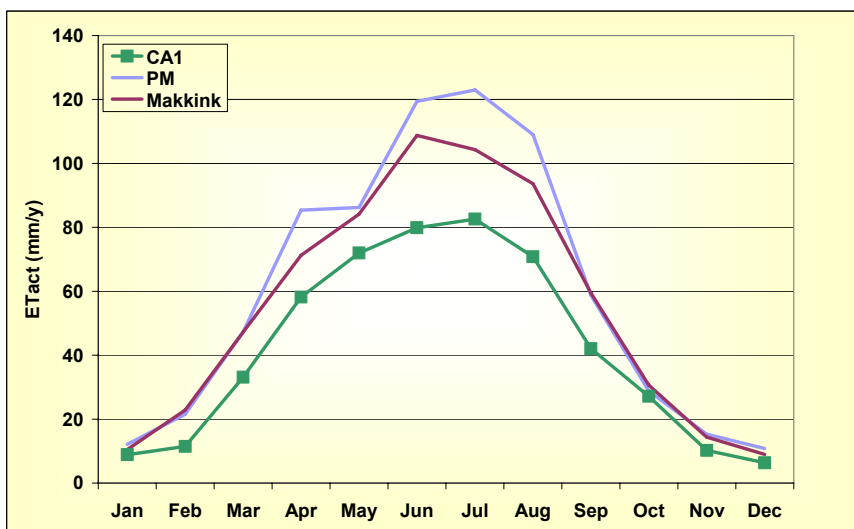
Voor de KNMI meet site van Cabauw waren actuele verdampingen beschikbaar over de periode 1987 tot en met 1996 (Beljaars en Bosveld, 1996). De jaarlijkse totalen en maandelijkse gemiddelden van deze reeks zijn te zien in Figuur 21. Voor de 3653 dagen die in deze periode vallen zijn ook de extreme actuele verdamping bekeken. In deze periode kwamen 15 dagen voor waarin de actuele verdamping hoger was dan  $5 \text{ mm d}^{-1}$  en 179 dagen met een actuele verdamping hoger dan  $4 \text{ mm d}^{-1}$ .

Een verdere analyse en vergelijking van actuele verdamping metingen kan gebeuren als er meer gegevens beschikbaar zijn. Deze paragraaf heeft een eerste aanzet gegeven voor hoe zo een vergelijking zou kunnen uitgevoerd worden.



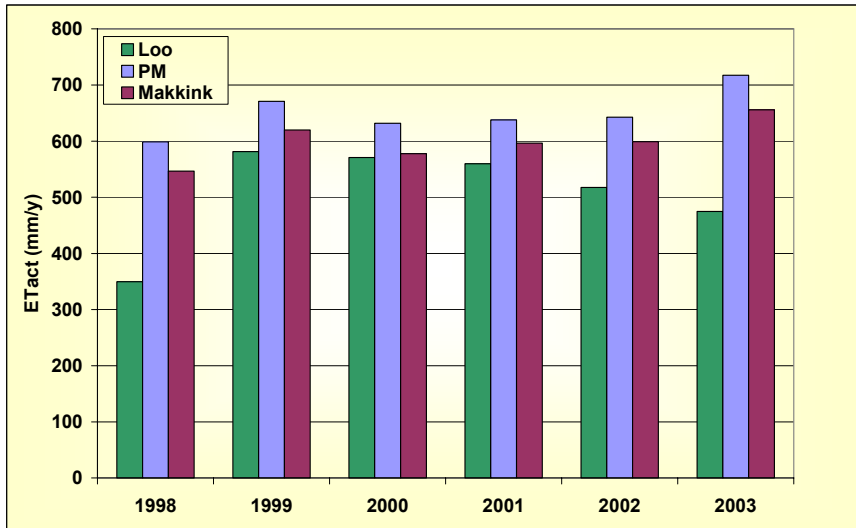


Figuur 18. Vergelijk gemeten maandelijkse actuele verdamping voor Cabauw (gras) en Loobos (naaldbos) voor 2003.

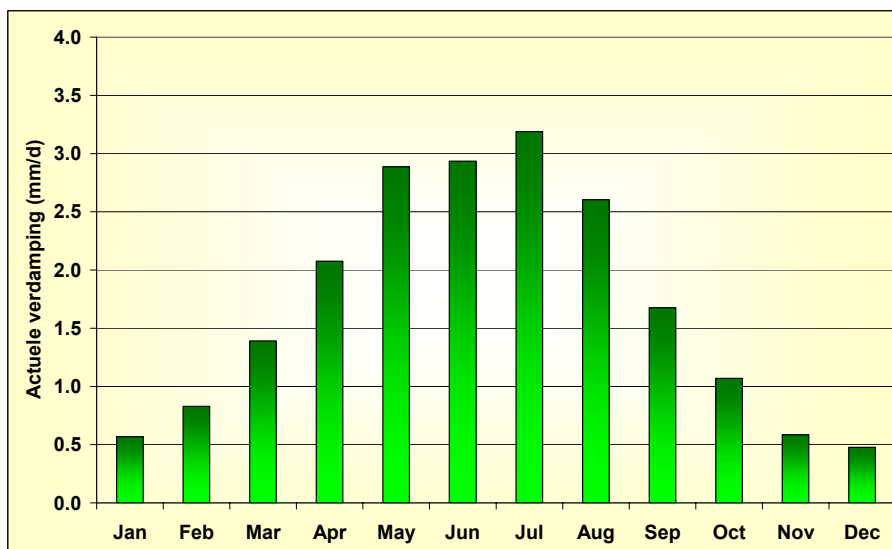
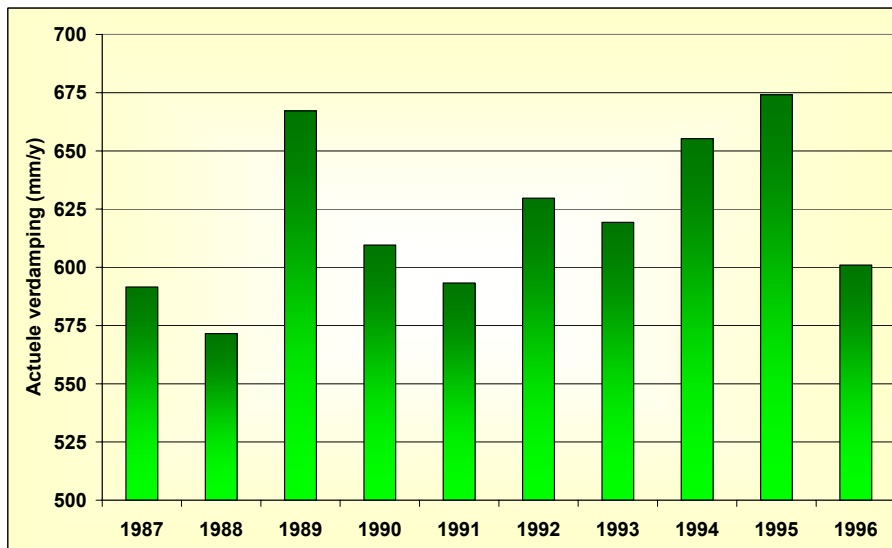


Figuur 19. Vergelijk gemeten actuele verdamping en referentie verdamping voor Cabauw (boven) en Loobos (onder) voor 2003.





Figuur 20. Gemeten actuele verdamping voor Loobos (naaldbos) en referentie verdamping volgens Makkink en Penman-Monteith.



Figuur 21. Jaarlijkse en gemiddeld maandelijkse actuele verdamping voor Cabauw.





# 4 Verdamping in hydrologische modellen

## 4.1 Overzicht per model

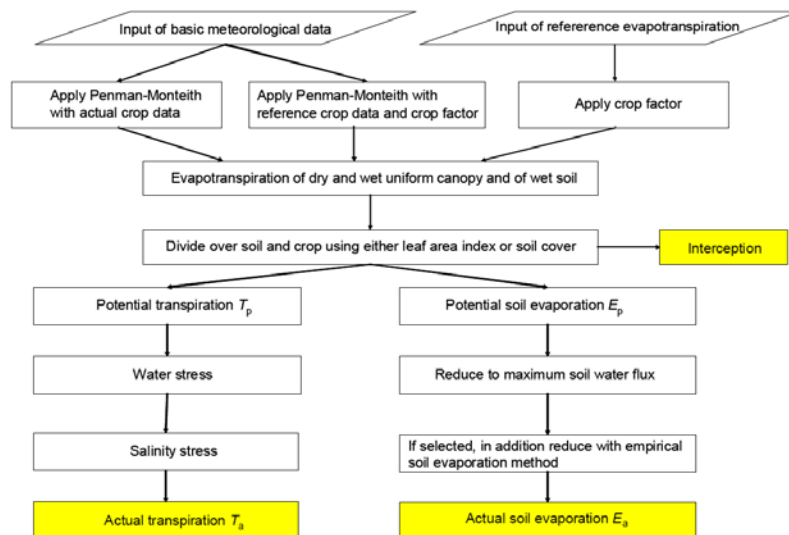
### 4.1.1 SWAP

Het SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant) simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. SWAP wordt gezien als het de-facto standaard model voor bepalen van actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens gecombineerd met gewas en bodemgegevens (Feddes et al., 2004).

Binnen SWAP zijn er een tweetal opties om referentie verdamping te gebruiken. Als eerste kan de dagelijkse referentie verdamping als invoer worden opgegeven, zodat de gebruiker zelf kan bepalen welke methode hiertoe wordt gebruikt. Een tweede methode is dat meteorologische gegevens als invoer worden gegeven, waarna SWAP zelf de referentie verdamping (eigenlijk direct de potentiële verdamping) berekend en deze dan gebruikt voor de verdere berekeningen. In Figuur 22 is dit schematisch weergegeven.

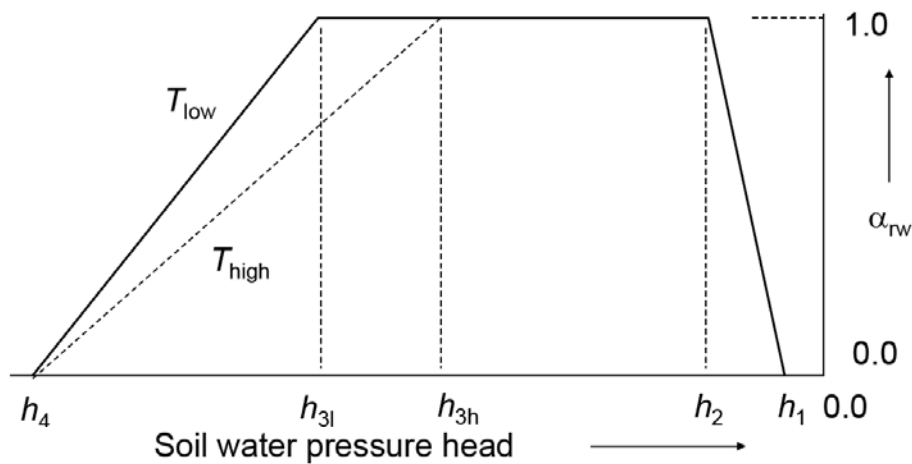
De reductie in actuele verdamping als gevolg van beschikbaar vocht in de bodem wordt weergegeven door de zogenaamde wortelonttrekkingsfunctie. Deze is te zien in Figuur 23 waaruit blijkt dat zowel te droge als te natte (eigenlijk zuurstoftekort) omstandigheden leiden tot een niet optimale verdamping omdat plantenwortels niet voldoende water op kunnen nemen.

Een uitgebreidere beschrijving van SWAP kan gevonden worden in Kroes et al. (2008). De SWAP simulaties zoals beschreven in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd met versie 3.2 (revision 14).



Figuur 22. Onderverdeling van de actuele verdamping in interceptie, plant en bodem (bron: Kroes et al., 2008).





**Figuur 23. Reductie coëfficiënt ( $\alpha_{rw}$ ) voor wortelopname als functie van de drukhoogte in de bodem (Feddes et al., 1978).**

#### 4.1.2 SIMGRO

De laatste versie van Simgro, versie 6, maakt voor het berekenen van de actuele verdamping gebruik van het MetaSWAP model. MetaSWAP beschrijft de niet-stationaire stroming van water in de onverzadigde zone en is gebaseerd op rekenexperimenten met een stationaire versie van SWAP. Deze metarelaties zijn afgeleid voor 2.881.788 stationaire SWAP berekeningen die verkregen zijn door combinaties te maken van: bodemprofielen, diktes van wortelzones, grondwaterstanden en fluxen. Resultaten van deze SWAP berekeningen zijn geconverteerd naar een database, die dus bekend staat als de module MetaSWAP.

De verschillen in berekende verdamping tussen SWAP en Simgro zijn erg klein (Schaap en Dik, 2007). Alleen bij dikke wortelzones is de verdamping zoals berekend door Simgro (lees MetaSWAP) lager.

Verdere details betreffende Simgro zijn te vinden in Van Walsum et al. (2006).

#### 4.1.3 SOBEK

De oorsprong van SOBEK is een model dat openwater processen simuleert en staat bekend onder CF: Channel Flow. Omdat de focus van SOBEK-CF op hydraulica ligt, wordt het hydrologische proces van openwater verdamping niet meegenomen. Om toch de complete hydrologisch cyclus te modelleren zijn er verschillende modules te koppelen aan SOBEK. Voor verdamping is de module RR (Rainfall Runoff) de meest belangrijke. SOBEK-RR is een puntmodel, ook wel bakjesmodel genoemd, waarbij verschillende deelgebieden worden geschematiseerd als reservoirs (bakjes). Verdamping wordt hierbij op een eenvoudige wijze berekend als functie van de referentie verdamping, landgebruik en vochttoestand in het reservoir.

De laatste tijd wordt SOBEK echter steeds vaker gebruikt in combinatie met andere modellen om zodoende de neerslag-verdamping-afvoer processen nauwkeuriger te bepalen. Zo zal het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium uit SOBEK-CF (of SIMGRO) en MetaSWAP en ModFlow en bestaan. Voor SOBEK zou dan alleen de openwater module van belang zijn.





#### 4.1.4 Directe ET modellen

De drie bovenstaande modellen gaan uit van de zogenaamde twee-staps aanpak om de actuele verdamping te bepalen. Eerst wordt de referentie verdamping bepaald, van waaruit de potentiële verdamping wordt berekend uitgaande van gewas eigenschappen. Vervolgens berekenen de modellen de vochttoestand en de daaruit volgende actuele verdamping. De laatste jaren begint er meer aandacht te komen om de actuele verdamping direct te bepalen zonder eerst de referentie verdamping uit te rekenen (Farahani et al., 2007). In de meeste gevallen wordt dit gedaan door in Penman-Monteith direct de actuele gewasweerstand te gebruiken waaruit direct de actuele verdamping kan worden berekend. Een uitgewerkt concept hoe dit zou kunnen worden uitgevoerd is gegeven door Shuttleworth (2006). Waterbeheerders zijn echter niet alleen geïnteresseerd in de actuele verdamping, maar in de gehele hydrologische kringloop. Daarom lijkt deze aanpak vooralsnog minder interessant voor hen. Met andere woorden: alleen het zo goed mogelijk weten van de actuele verdamping is niet voldoende om beleidmatige beslissingen te nemen voor regionale waterbeheerders. Het is daarom aan te bevelen voor regionale waterbeheerders om de twee-staps aanpak te blijven volgen.

## 4.2 Gevoeligheid modelinvoer op verdamping

Het SWAP model wordt in Nederland en daarbuiten gezien als de standaard voor het nauwkeurig modeleren van de actuele verdamping. Voor deze studie is er daarom voor gekozen om het SWAP model te gebruiken om een aantal specifieke verdampingsvragen te beantwoorden, die relevant zijn voor het gebruik van actuele verdamping in strategische studies. De volgende vragen zijn geanalyseerd:

1. Wat is de invloed van het gebruik van Penman-Monteith en Makkink op de uiteindelijke actuele verdamping.
2. Wat is het verschil tussen gebruik van de externe Penman-Monteith berekening en de interne SWAP berekening.
3. Hoe gevoelig zijn verschillende parameters binnen SWAP om de actuele verdamping te beïnvloeden.
4. Hoe belangrijk is een juiste inschatting van de actuele verdamping bij scenario analyses.

Om ervoor te zorgen dat de conclusies van de analyses niet toevallig bepaald zijn door een keuze van één SWAP schematisatie, zijn twee goed gedocumenteerde SWAP modellen gebruikt die verschillende gewassen, bodems en hydrologische eigenschappen hebben. Het eerste model is een maïs perceel in Hupsel (Kroes et al., 2008) en het tweede een grasland in Ruurlo (Renaud, et al. 2005). Beide modellen worden in de SWAP handleiding beschreven en worden als standaard runs toegepast bij SWAP testen. In dit rapport zullen deze modellen aangeduid worden als maïs en gras. De modellen zijn gebruikt met 10 jaar KNMI De Bilt gegevens (1998-2007).

### 4.2.1 Penman-Monteith versus Makkink

Als eerste is gekeken in hoeverre het gebruik van Penman-Monteith en Makkink verschillen in de uiteindelijke actuele verdamping bepaling. Zoals eerder aangegeven zijn we uitgegaan van twee SWAP schematisaties. In Tabel 7, Figuur 24 en Figuur 25 zijn de belangrijkste resultaten weergegeven. De meest opvallende conclusies die uit deze tabel en figuren zijn te halen:



- *De potentiële verdamping kan hoger zijn dan de drie afzonderlijke verdampingstermen*  
Dit komt doordat SWAP interceptie berekent als functie van de neerslag en berekent niet expliciet of dit direct verdampt. Interceptie wordt dus alleen gezien als een verminderde hoeveelheid neerslag (of irrigatie) die in de bodem komt. Dit concept zou nader bekeken moeten worden.
- *De twee schematisaties laten een groot verschil in de berekende actuele verdamping zien*  
Voor beide simulaties zijn precies dezelfde meteorologische gegevens gebruikt. Gewas, bodem, drainage en onderrand zijn uitermate bepalend voor de uiteindelijke actuele verdamping. Dit laat zien dat het routinematig meten van actuele verdamping gewas en locatie specifiek zijn. Bij het eventueel starten van routinematige metingen moet hier dus rekening mee gehouden worden.
- *De potentiële verdamping is verschillend voor de twee schematisaties*  
Hoewel dezelfde meteorologische gegevens zijn gebruikt is de potentiële verdamping uiteraard verschillend. Dit versterkt nogmaals dat de soms toegepaste methode voor het bepalen van de actuele verdamping met behulp van Makkink en een constante factor onjuist is.
- *Actuele verdamping voor Penman-Monteith is hoger dan Makkink bij hogere waardes*  
Het is bekend dat de referentie verdamping voor Penman-Monteith meestal hoger is dan bij Makkink. Het blijkt dat dit ook doorwerkt in de actuele verdamping. Dit verstrekt nogmaals de eerdere conclusies dat Makkink minder geschikt is bij hogere verdamping.
- *Verschillen zijn voor maïs hoger dan voor gras.*  
De dagelijkse verschillen tussen Penman-Monteith en Makkink zijn voor maïs groter dan voor gras, omdat gras dichter bij het standaard referentie gewas ligt. Wederom laat dit zien dat het gebruik van Makkink met een vaste constante factor voor een benadering van de actuele verdamping onjuist is.

Bovenstaande punten zijn van belang om aan te tonen dat er verschillen zijn en waar deze aan toe te schrijven zijn. Uiteraard is een vergelijk met werkelijke metingen gewenst om tot een uitspraak te komen over de nauwkeurigheid.

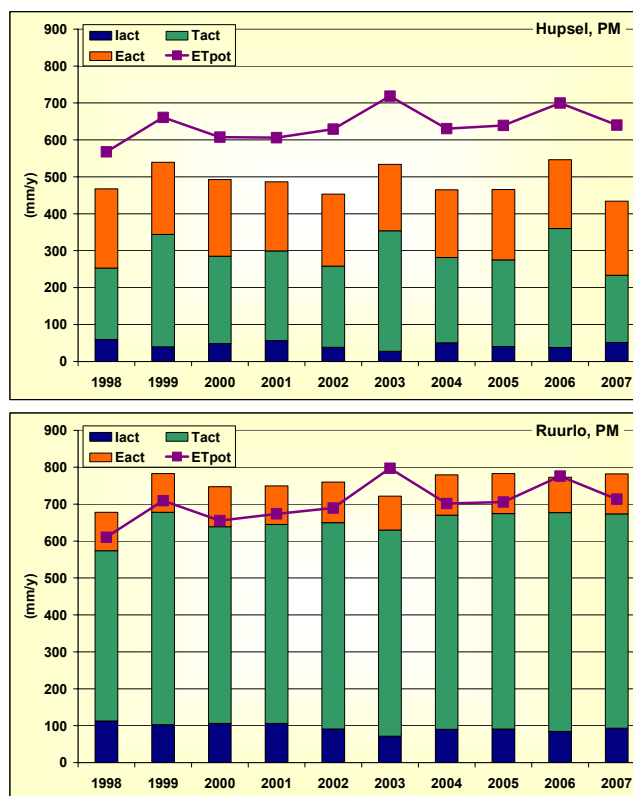
Aanbeveling lange termijn  
Het concept van interceptie verdamping binnen SWAP, waarbij deze geen functie is van de referentie verdamping, zou nader bestudeerd moeten worden.

**Tabel 7. Verschil in actuele verdamping bij gebruik Penman-Monteith en Makkink berekend met SWAP. Positief betekent Penman-Monteith hogere verdamping.**

YY	potentiële verdamping	Tact	Eact	Tot
maïs	(mm/y)	(mm/y)	(mm/y)	(mm/y)
1998	54	29	18	47
1999	57	45	16	60
2000	57	31	20	51
2001	43	36	-1	35
2002	44	15	9	24
2003	64	29	3	32
2004	62	35	10	45
2005	39	21	2	23
2006	86	40	10	50
2007	55	7	19	26



gras				
1998	53	38	8	46
1999	53	41	6	47
2000	54	49	8	57
2001	49	43	4	46
2002	51	39	5	44
2003	71	10	-3	7
2004	66	54	7	62
2005	47	41	4	45
2006	98	51	0	51
2007	59	48	6	55



**Figuur 24. Verdampingstermen voor de twee SWAP modellen met Penman-Monteith.**

*lact* = actuele interceptieverdamping, *Tact* = actuele gewasverdamping, *Eact* = actuele bodemverdamping, *potentiële verdamping* = potentiële verdamping

#### 4.2.2 Referentie ET versus SWAP interne berekening

Het SWAP model geeft naast de mogelijkheid om referentie verdamping als invoer te gebruiken ook de optie om intern de referentie verdamping te berekenen gebaseerd op Penman-Monteith. Uit Figuur 22 is te zien dat deze interne berekening ook weer twee opties heeft. Als eerste kan SWAP de standaard referentie verdamping berekenen, uitgaande van het standaard referentiegewas ( $r_{crop} = 70 \text{ s m}^{-1}$ ,  $h_{crop} = 12 \text{ cm}$ ,  $\alpha_r = 0.23$ ). De tweede mogelijkheid is om niet uit te gaan van het standaard referentiegewas, maar uit te gaan van de werkelijke gewasgegevens (gewasweerstand, hoogte en albedo).

De eerste van bovenstaande twee opties lijkt dus veel op het opgeven van referentie verdamping in de meteo file. Er is echter een essentieel verschil. SWAP berekent niet één enkele referentie verdamping, maar drie verschillende referentie verdamping grootheden: (i)



Tref<sub>nat</sub>: de referentie voor een volledig nat gewas, (ii) Tref<sub>droog</sub>: referentie voor een volledig droog gewas, (iii) Eref<sub>nat</sub>: referentie voor een natte bodem.

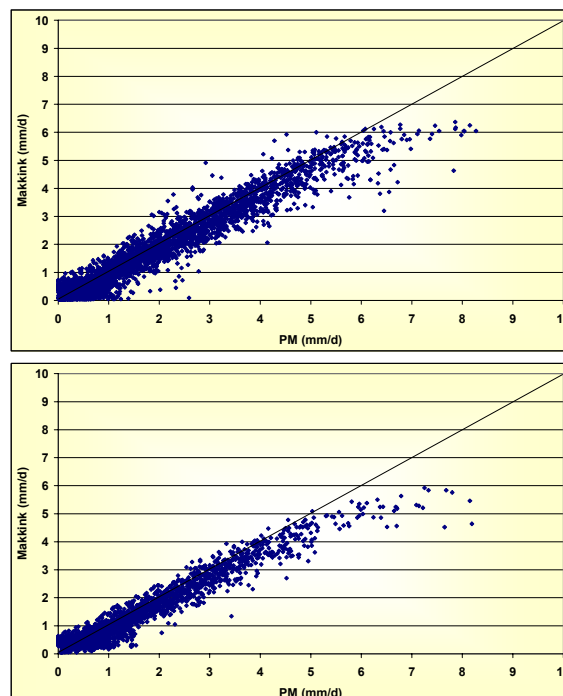
In Figuur 26 is te zien dat het gebruik van deze vier methoden veel invloed heeft op de actuele verdamping. Bovendien zijn de verschillen voor maïs en gras ook niet gelijk. Voor de maïs simulatie geeft de volledige SWAP Penman-Monteith de hoogste actuele verdamping, terwijl voor gras de referentie SWAP Penman-Monteith de hoogste waarden geeft. Figuur 27 laat zien dat deze verschillen in actuele verdamping veroorzaakt worden door de referentie verdamping zoals berekend met de vier methoden. Dit laat nogmaals zien dat de keuze voor een bepaalde referentie verdamping methode veel invloed heeft en dus goed overwogen moet worden.

De verklaring voor deze verschillen kan puntsgewijs samengevat worden als:

- Makkink geeft laagste waarden omdat alleen straling wordt meegenomen en er geen aërodynamische component wordt berekend.
- De PMref is hoger dan de SWAP\_PMref omdat de laatste ervan uitgaat dat de gewasweerstand bij een nat gewas (en een natte bodem)  $0 \text{ s m}^{-1}$  is. Bij PMref is dit altijd  $70 \text{ s m}^{-1}$ . Ook wordt bij SWAP\_PMref direct vermenigvuldigd met de gewasfactor  $k_c$ .
- De SWAP\_PMfull geeft de hoogste waarden voor maïs, omdat gebruik gemaakt wordt van een veel hogere gewashoogte dan de referentie.
- Voor gras ligt de SWAP\_PMfull dichtbij de PMref omdat werkelijke gewaseigenschappen bijna gelijk zijn aan de referentiegewas eigenschappen.

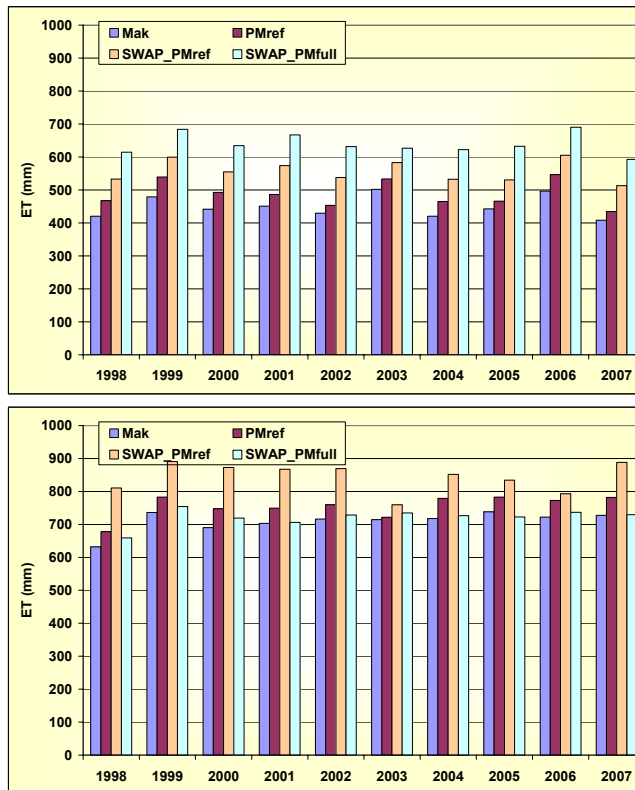
Aanbeveling korte termijn

Bij gebruik van Penman-Monteith in SWAP kan beter gebruik gemaakt worden van de interne berekening van de referentie verdamping.

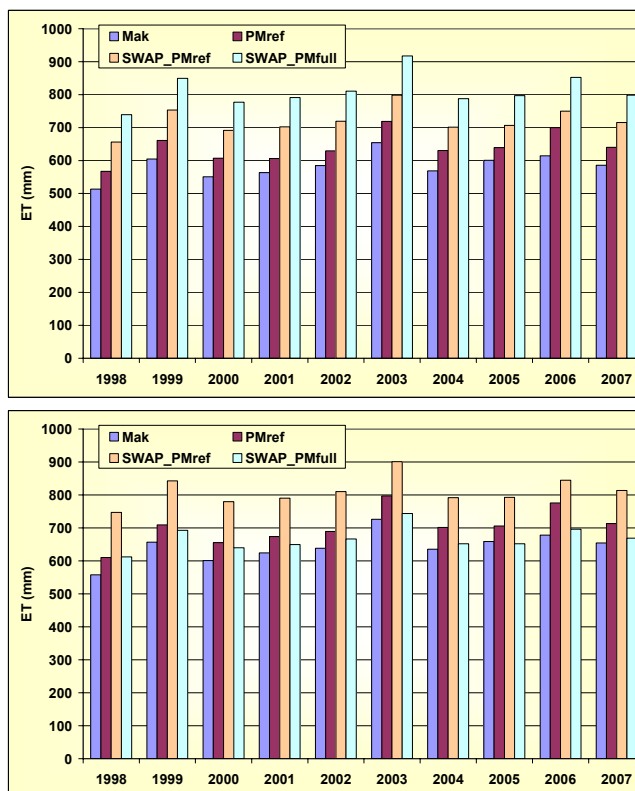


**Figuur 25. Vergelijk actuele verdamping berekend met SWAP over 10 jaar (boven: maïs; onder: gras).**





Figuur 26. Actuele verdamping berekend met SWAP voor vier ET opties (boven: maïs; onder: gras).



Figuur 27. Potentiële verdamping berekend met SWAP voor vier ET opties (boven: maïs; onder: gras).



### 4.2.3 Gevoeligheid SWAP parameters

Een standaard aanpak bij het inzetten van modellen ter ondersteuning van strategische beslissingen is het model eerst te ontwikkelen voor de huidige situatie en vervolgens een aantal mogelijke veranderingen door te rekenen. Onderdeel van het bouwen van een model voor de huidige situatie vormt de kalibratie om de werkelijkheid zo goed mogelijk na te bootsen. Deze kalibratie kan uitgevoerd worden met behulp van metingen en/of door inzicht van experts.

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat de methode om de referentie verdamping te bepalen al een grote invloed heeft op de uiteindelijke actuele verdamping. Om toch de mogelijkheid hebben om tijdens een kalibratie de actuele verdamping te sturen, is het belangrijk om te weten welke parameters hiervoor gebruikt kunnen worden. Er zijn uiteraard veel parameters die uiteindelijk de grootte van de verdamping bepalen (neerslag, drooglegging, grondwaterstand, drainage, irrigatie etc.), maar deze zijn niet zozeer verdampingspecifiek en daarom niet geschikt om de verdamping te sturen. In totaal zijn er 12 parameters die geschikt zijn om te gebruiken voor kalibratie en sturing van de actuele verdamping:

- CFBS: Epot coefficient (-)
- KDIF: coëfficiënt voor diffuus licht (-)
- KDIR: coëfficiënt voor direct licht (-)
- LAI: Leaf Area Index (-)
- CF: Gewas factor (-)
- RD: Worteldiepte (cm)
- HLIM1: Reductie (cm)
- HLIM2: Reductie (cm)
- HLIM3: Reductie (cm)
- HLIM4: Reductie (cm)
- COFAB: Interceptie coëfficiënt (cm)
- RDCTB: worteldichtheid (-)

Voor elk van deze parameters is er voor gekozen om de waarde van de huidige schematisatie aan te houden. Daarnaast is bepaald wat de minimale en maximale waarden van de betreffende parameter is, rekening houdend met realistische grenzen. In Tabel 8 is te zien welke waarden in de standaard schematisatie zijn en wat de realistisch onder en bovengrens waarden zijn.

Vervolgens zijn de twee modellen toegepast voor de periode van 10 jaar (1998-2007) met voor elke parameter de: (i) minimale waarde, (ii) gemiddelde van minimale en standaard waarde, (iii) standaard waarde, (iv) gemiddelde van standaard en maximale waarde, (v) maximale waarde. In totaal zijn er dus 1200 jaar doorgerekend (2 modellen x 10 jaar x 12 parameters x 5 parameter waarden). Om deze grootte hoeveelheid simulaties uit te voeren en vooral om de analyse van de uitvoer mogelijk te maken, is gebruik gemaakt van het software pakket PEST (Doherty, 2004).

Een aantal typische voorbeelden van de resultaten van deze analyses zijn te zien in Figuur 28. De bovenste figuur laat zien dat veranderingen in de Leaf Area Index (LAI) invloed heeft op alle drie de verdampingstermen: interceptie, bodemverdamping, gewastranspiratie. Bij hogere LAI waarden neemt de interceptieverdamping toe, de bodemverdamping wat af en de gewastranspiratie neemt ook toe. De totale actuele verdamping neemt met gemiddeld met ruim 50 mm per jaar toe (1998-2007). In de middelste figuur is te zien dat de coëfficiënt voor diffuus licht (KDIF) relatief weinig invloed heeft op de interceptie, maar bij hogere waarden de transpiratie



flink doet toenemen en de bodemverdamping doet afnemen. Tenslotte laat Figuur 28 onderaan zien dat de gevoeligheid niet altijd lineair verloopt. De reductiefactor voor wateropname van wortels onder natte omstandigheden (HLIM1) heeft pas invloed als de parameter een grenswaarden van -50 cm bereikt.

Uit Tabel 9 blijkt dat de volgende strategie kan worden gebruikt voor het kalibreren van de verdamping:

- beïnvloeden interceptie: COFAB
- beïnvloeden gewastranspiratie: CF
- beïnvloeden gewastranspiratie natte omstandigheden: HLIM1 en/of HLIM2
- beïnvloeden bodemverdamping: CFBS, KDIF, KDIR

De niet genoemde parameters zijn minder geschikt, omdat ze weinig gevoelig zijn binnen de realistische grenzen of meer dan één component van de verdamping beïnvloeden.

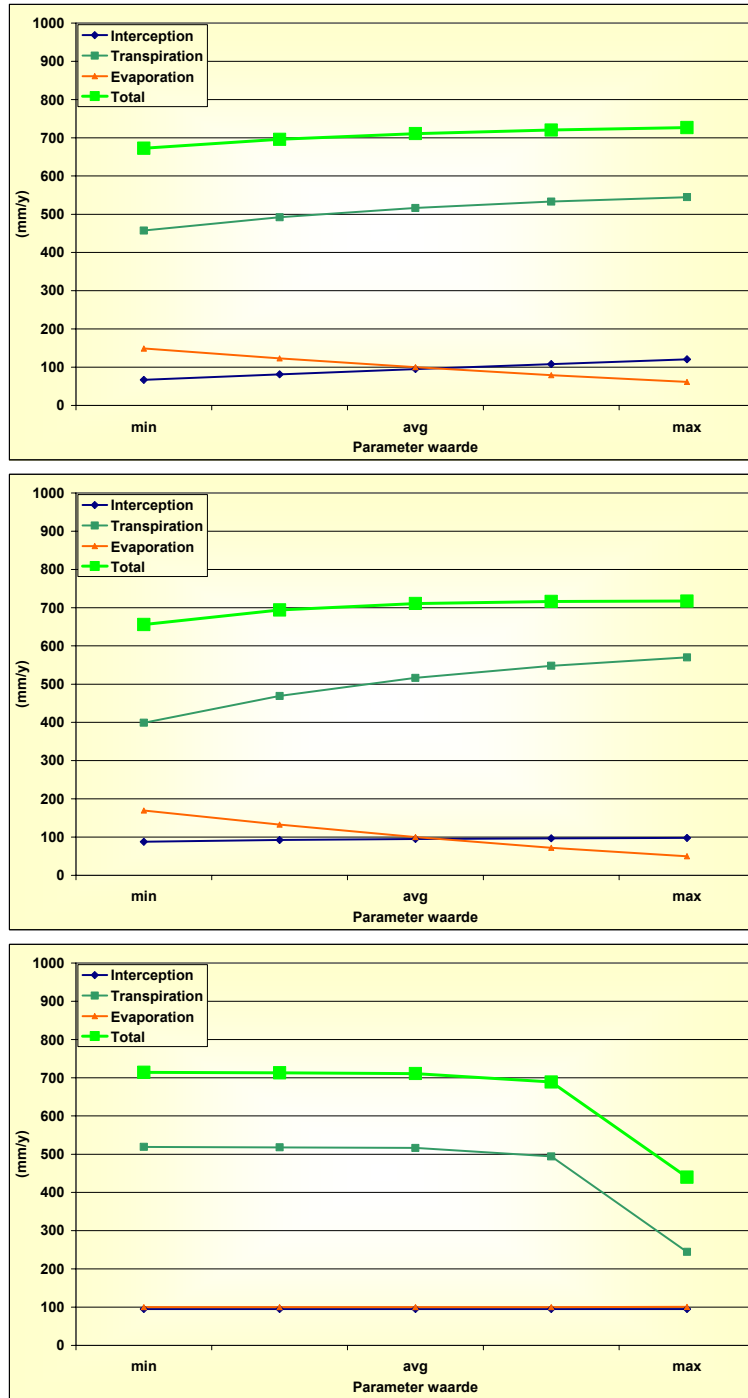
**Tabel 8. Parameters gebruikt om gevoeligheid op verdamping te testen.**

Parameter	maïs			gras		
	Standaard	Min	Max	Standaard	Min	Max
CFBS: Epot coefficient (-)	1	0.5	1.5	1	0.5	1.5
KDIF: coëfficiënt for diffuus licht (-)	0.6	0.4	1.1	0.75	0.4	1.1
KDIR: coëfficiënt voor direct licht (-)	0.75	0.4	1.1	0.75	0.4	1.1
LAI: Leaf Area Index (-)	5	3	7	3	2	4
CF: Gewas factor (-)	1.2	0.8	1.5	1.2	0.8	1.5
RD: Worteldiepte (cm)	100	50	120	30	10	40
HLIM1: Reductie (cm)	-15	0	-50	-10	0	-50
HLIM2: Reductie (cm)	-30	0	-50	-25	0	-50
HLIM3: Reductie (cm)	-600	-100	-1000	-800	-100	-1000
HLIM4: Reductie (cm)	-8000	-1000	-16000	-8000	-1000	-16000
COFAB: Interceptie coëfficiënt (cm)	0.25	0.1	0.5	0.25	0.1	0.5
RDCTB: worteldichtheid (-)	0.5	0	1	0.5	0	1

**Tabel 9. Resultaten gevoeligheidsanalyse. Aangegeven is het verschil in verdamping tussen de hoogste en de laagste parameter waarden in mm per jaar.**

	maïs				gras			
	interceptie	transpiratie	verdamping	totaal	interceptie	transpiratie	verdamping	totaal
CFBS	0	-111	109	-2	0	-102	79	-22
KDIF	4	107	-62	49	10	171	-120	61
KDIR	5	116	-62	58	10	171	-120	61
LAI	31	79	-54	56	54	87	-88	54
CF	0	221	0	221	0	366	-6	360
RD	0	-82	0	-81	0	-8	1	-7
HLIM1	0	-156	0	-156	0	-275	1	-274
HLIM2	0	-60	0	-60	0	-33	0	-33
HLIM3	0	0	0	0	0	2	0	2
HLIM4	0	0	0	0	0	5	-2	3
COFAB	54	-33	-1	20	111	-66	-2	43
RDCTB	0	-47	0	-47	0	-3	0	-2





Figuur 28. Voorbeeld van invloed van model parameters op verdamping (boven: LAI; midden: KDIF; onder: HLIM1).

#### 4.2.4 Absolute versus relatieve nauwkeurigheid.

Bij het gebruik van modellen voor het ondersteunen van strategische beslissingen worden verschillende scenario's met elkaar vergeleken. Er wordt dan uitgegaan van de zogenaamde base-line, de huidige situatie, en deze wordt dan vergeleken met één of meerdere scenario's. Het is van belang om het begrip scenario in te delen in twee wezenlijk verschillende concepten: interne en externe invloeden. De laatste zijn veranderende omstandigheden waar de water-beheerder weinig tot niets aan kan doen: klimaatverandering, beschikbaarheid van water voor





inlaatbeheer, ruimtelijke planning. Daarnaast zijn er de interne invloeden, de maatregelen, waar de waterbeheerder wel direct invloed op heeft.

De grote vraag is in hoeverre modelnauwkeurigheid van belang is indien verschillende scenario's worden vergeleken. Er wordt vaak vanuit gegaan dat de relatieve model nauwkeurigheid groter is dan de absolute nauwkeurigheid. Met andere woorden: indien zowel in het base-line model als in het scenario model dezelfde fouten zitten, is het verschil tussen deze twee modellen nog steeds een goede indicatie van de veranderingen in de werkelijkheid. Er heerst de algemene consensus dat model nauwkeurigheid niet meer afhangt van de modellen zelf, maar van de invoer die in de modellen wordt gestopt. In het kader van deze studie kan dus de vraag gesteld worden: wat is de invloed van eventuele onnauwkeurigheden in de schatting van de verdamping op scenario analyses.

Als concreet voorbeeld wordt ervan uitgegaan dat er een maatregel wordt bestudeerd om de gemiddelde drainage afstand te veranderen en wat het effect op de verdamping zou zijn. In de standaard schematisatie voor maïs is de drainage afstand 11 meter. Als scenario (maatregel) wordt er bekeken wat de invloed is bij een halvering van deze afstand en verdubbeling van deze afstand. De bovenste drie regels van Tabel 10 geven aan wat de invloed zou zijn, uitgaande van het meest betrouwbare model en data. Het blijkt dat een halvering van de drainage afstand de totale verdamping met 15 mm toeneemt en bij een verdubbeling van de drainage afstand naar 22 meter de totale actuele verdamping afneemt met 53 mm per jaar als gevolg van te natte omstandigheden.

Regel 4 tot en met 6 van Tabel 10 veronderstelt dat er een fout in de Makkink referentie verdamping aanwezig is (door meetfouten, of door ruimtelijke variatie), waardoor de referentie verdamping 20% lager is dan in werkelijkheid. Uiteraard neemt de totale actuele verdamping, in vergelijking met de oorspronkelijke Makkink referentie verdamping, ook af. Interessant is dat deze afname in actuele verdamping tussen de 25% en 30% ligt, wat veroorzaakt wordt door het niet-lineaire karakter van de bodem-water-plant interacties. Indien gekeken wordt naar het verschil ten opzicht van het base line scenario van een drainage afstand van 11 meter, blijkt dat dit bijna constant is. Voor de andere veronderstelde onnauwkeurigheden in Makkink referentie verdamping blijkt hetzelfde op te gaan.

De conclusie van deze analyse is dat zelfs indien er een onnauwkeurigheid optreedt in de referentie verdamping, scenario analyse uitkomsten nog steeds erg betrouwbaar zijn voor strategische studies. Aan dit aspect van model toepassingen, absolute ten opzichte van relatieve betrouwbaarheid, is tot nu toe zeer weinig aandacht besteed (Bormann, 2005; Droogers et al., 2007). De implicatie van deze conclusie is echter groot. In veel studies ligt de nadruk op het zo getrouw mogelijk simuleren van de werkelijkheid, waardoor voor scenario analyses en discussies vaak minder tijd overblijft. Uiteraard moet wel gecontroleerd worden of voor elke situatie deze conclusie opgaat. Dit kan echter relatief simpel worden uitgevoerd door gebruik te maken van de aanpak zoals hiervoor beschreven.

Aanbeveling korte termijn

Bij het analyseren van verschillende scenario's is de gebruikte referentie verdamping vaak minder belangrijk. Via een eenvoudige check kan dit voor elke situatie gecontroleerd worden.

Het is duidelijk dat bij het ontwerpen van maatregelen wel een absolute nauwkeurigheid gewenst is. Bovenstaande aanbeveling moet dan vooral gezien worden bij studies waarbij



vragen worden gesteld in de trend van: “hoeveel mm water moet er extra worden aangevoerd als...” en “hoeveel extra schade zal er optreden als het grondwater 25 cm daalt”.

**Tabel 10. Invloed verandering drainage afstand als functie van de referentie verdamping. Alle waarden in gemiddelde per jaar (1998-2007).**

					Verschil t.o.v. base (11 m)	
	interceptie	transpiratie	verdamping	totaal	mm	%
<b>Makkink</b>						
Drain5.5	47	250	179	476	15	3
Drain11	47	234	180	461		
Drain22	47	177	185	408	-53	-11
<b>Makkink -20%</b>						
Drain5.5	47	177	157	380	15	4
Drain11	47	162	157	366		
Drain22	47	110	161	319	-47	-13
<b>Makkink -10%</b>						
Drain5.5	47	212	168	427	15	4
Drain11	47	196	169	412		
Drain22	47	140	174	361	-51	-12
<b>Makkink +10%</b>						
Drain5.5	47	290	189	526	14	3
Drain11	47	275	190	512		
Drain22	47	218	195	460	-52	-10
<b>Makkink +20%</b>						
Drain5.5	47	332	198	578	12	2
Drain11	47	320	199	566		
Drain22	47	266	205	517	-48	-9



## 5 Klimaatverandering

### 5.1 KNMI Klimaatscenario's

In 2006 heeft het KNMI de laatste klimaatprojecties voor neerslag en referentie verdamping gepresenteerd. De nieuwe scenario's zijn een update van de vorige generatie die ten behoeve van de commissie Waterbeheer 21e Eeuw (WB21) waren opgesteld. Net als de WB21 klimaatscenario's worden er in de nieuwe scenario's (kortweg aangeduid als de KNMI'06 klimaatscenario's) getallen gegeven voor de verandering van neerslag, temperatuur, referentie verdamping, wind en zeeniveau (Tabel 11). Ook worden naast seizoensgemiddelde waarden ook veranderingen in een aantal extreme grootheden gekwantificeerd, zoals de temperatuur op de warmste of koudste dag van het jaar, of de verandering van de 10-daagse neerslagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden.

Een aantal grootheden in de KNMI'06 scenario's is op een andere manier gedefinieerd dan in de WB21 scenario's (zoals de vervanging van bijvoorbeeld "intensiteit van zomerse buien" door "dagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden"), en er zijn nieuwe grootheden bijgekomen (zoals het aantal dagen met neerslag). De keuze van de variabelen is echter niet wat het meest in het oog springt bij de KNMI'06 klimaatscenario's. De indeling van drie naar vier scenario's en de definitie van deze scenario's is aanzienlijk gewijzigd.

In de WB21 scenario's werd gesproken van een "laag", "midden" en "hoog" scenario, later nog aangevuld met een "hoog droog" scenario ten behoeve van de Droogtestudie. De nieuwe KNMI'06 klimaatscenario's bevatten nu vier scenario's (Figuur 29). Deze vier zijn gebaseerd op analyse van resultaten van wereldwijde klimaatmodellen die aangaven dat de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur rond 2050 hoogst waarschijnlijk ergens tussen de +1°C en +2°C uitkomt. Deze temperatuurstijgingen vormen het uitgangspunt voor de Gematigde (G) en Warme (W) klimaatscenario's. Echter, voor het klimaat in Nederland is niet alleen de wereldgemiddelde temperatuur van belang: ook de gemiddelde windrichting speelt een cruciale rol. Winters met een sterke westelijke stroming zijn in de regel een stuk milder en natter dan wanneer de stroming minder sterk westelijk is. En een deel van de bestudeerde klimaatmodellen laat zien dat de statistiek van de westelijke stromingen behoorlijk kan veranderen wanneer de wereldgemiddelde temperatuur stijgt. Sommige modellen laten in de winter een sterkere westelijke stroming zien, terwijl in de zomer juist meer dagen voorkomen met een oostelijke windrichting. Die gaat gepaard met een grotere kans op warm en droog weer. De veranderingen in stromingspatronen zijn echter het gevolg van een serie complexe processen en daarom wijken verschillende modellen ook sterk van elkaar af. De klimaatscenario's nemen deze onzekere veranderingen mee. Naast de twee scenario's zonder verandering in luchtstroming zijn er nu twee scenario's, waarin de verandering in luchtstroming wel is meegenomen: de G+ en W+ scenario's.

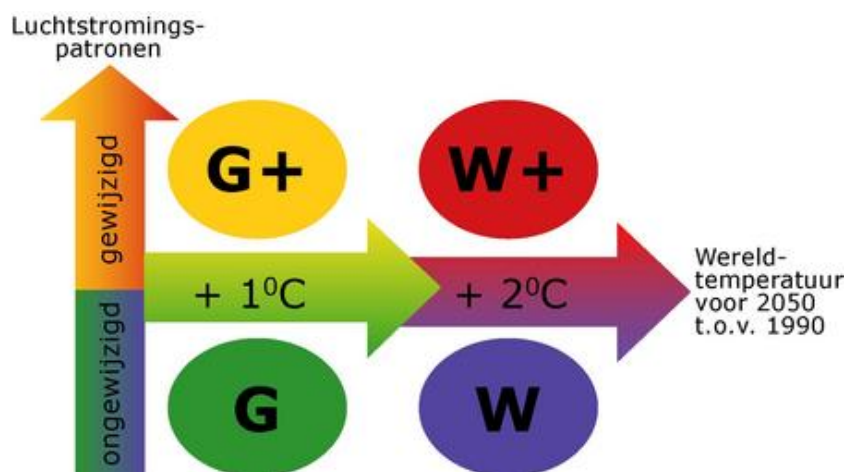
De verwachte verandering in referentie<sup>1</sup> verdamping staan vermeld in Tabel 12. De wetenschappelijke achtergrond bij deze verwachtingen staan uitgebreid beschreven in Van den Hurk et al. (2006). Hoe deze veranderingen voor de zomer- en wintermaanden zijn omgezet naar maandwaarden staat beschreven in Lenderink (2006).

---

<sup>1</sup> In de KNMI rapportages betreffende de KNMI'06 scenario's worden de termen referentie en potentiële verdamping door elkaar gebruikt. Uit de context blijkt echter dat altijd de referentie verdamping wordt bedoeld.



Voor het klimaat rond 2100 kunnen voor de scenario's G en G+ de waarden voor W en W+ rond 2050 gebruikt worden. Voor het klimaat rond 2100 voor de scenario's W en W+ kan het dubbele van de waarden voor deze scenario's rond 2050 gebruikt worden. Veranderingen in referentie verdamping voor de tijdshorizonten 2020, 2030, 2040, 2060, 2070, 2080 en 2090 kunnen verkregen worden door lineaire interpolatie van de maandwaarden tussen 1990 en 2050 en tussen 2050 en 2100 (Lenderink, 2006). In Figuur 30 zijn deze maandelijkse toename van de referentie verdamping voor 2050 en 2100 te zien. Vooral de verwachtingen voor de situatie onder het W+ scenario rond 2100 zijn dramatisch te noemen.



**Figuur 29. Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's. G en G+ hebben een Gematigde opwarming van +1°C in 2050 t.o.v. 1990, terwijl W en W+ uitgaan van een Warmer klimaat (+2°C). De "+" geeft aan dat in de scenario's rekening wordt gehouden met een sterke verandering van de gemiddelde luchtstromingen.**

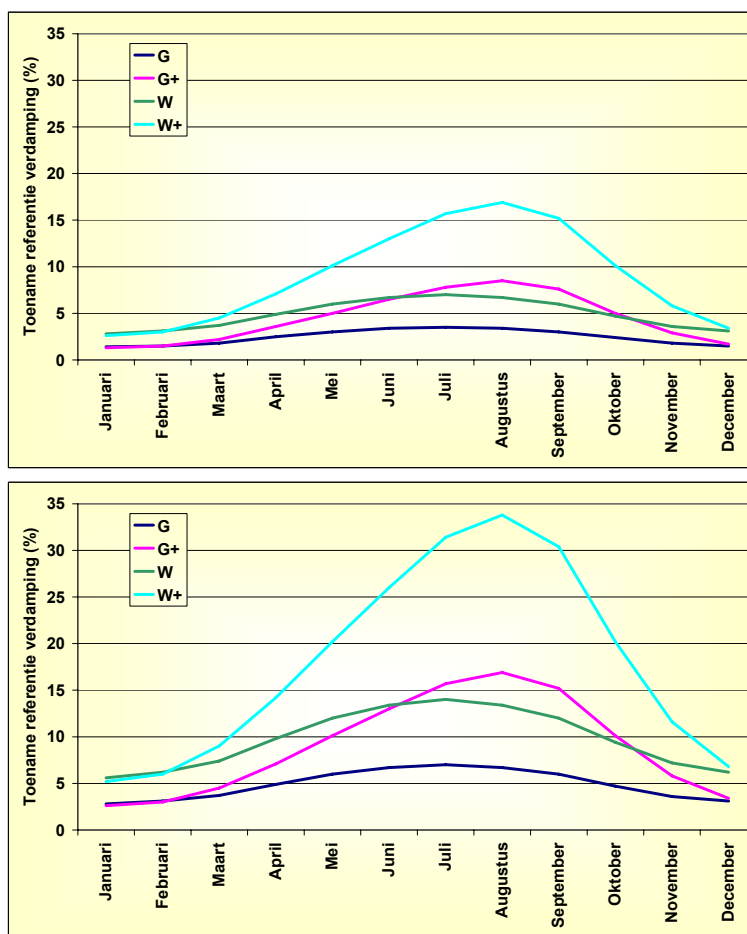
**Tabel 11. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050.**

	WB21			KNMI'06			
	Laag	Centraal	Hoog	G	G+	W	W+
<b>Zomer</b> (juni, juli, augustus)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.4	+1.7	+2.8
warmste zomerdag (°C)				+1.0	+1.9	+2.1	+3.8
gemiddelde neerslag (%)	+0.5	+1	+2	+3	-10	+6	-19
aantal natte dagen (%)				-2	-10	-3	-19
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+13	+5	+27	+10
referentie verdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35
<b>Winter</b> (december, januari, februari)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.1	+1.8	+2.3
koudste winterdag (°C)				+1.0	+1.5	+2.1	+2.9
gemiddelde neerslag (%)	+3	+6	+12	+4	+7	+7	+14
aantal natte dagen (%)				0	+1	0	+2
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+4	+6	+8	+12
referentie verdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35



Tabel 12. Gemiddelde procentuele verandering in referentie verdamping per maand voor het klimaat rond 2050 ten opzichte van het klimaat rond 1990 voor de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's. (Bron: [http://climexp.knmi.nl/Scenarios\\_monthly/](http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/))

	G	G+	W	W+
Januari	1,4	1,3	2,8	2,6
Februari	1,5	1,5	3,1	3,0
Maart	1,8	2,2	3,7	4,5
April	2,5	3,6	4,9	7,1
Mei	3,0	5,0	6,0	10,1
Juni	3,4	6,5	6,7	13,0
Juli	3,5	7,8	7,0	15,7
Augustus	3,4	8,5	6,7	16,9
September	3,0	7,6	6,0	15,2
Oktober	2,4	5,0	4,7	10,1
November	1,8	2,9	3,6	5,8
December	1,5	1,7	3,1	3,4



Figuur 30. Toename referentie verdamping voor 2050 (boven) en 2100 (onder).

## 5.2 CO<sub>2</sub> effect

Sinds het aflopen van de laatste grote ijstijd, 12 duizend jaar geleden, is de concentratie van CO<sub>2</sub> van ongeveer 280 ppm nagenoeg constant gebleven. Hierin is verandering gekomen sinds



het begin van de industriële revolutie (1750). De atmosferische concentraties van CO<sub>2</sub> is nu met ongeveer 35% gestegen tot 380 ppm. Rond 2050 wordt een verhoging tot 550 ppm verwacht.

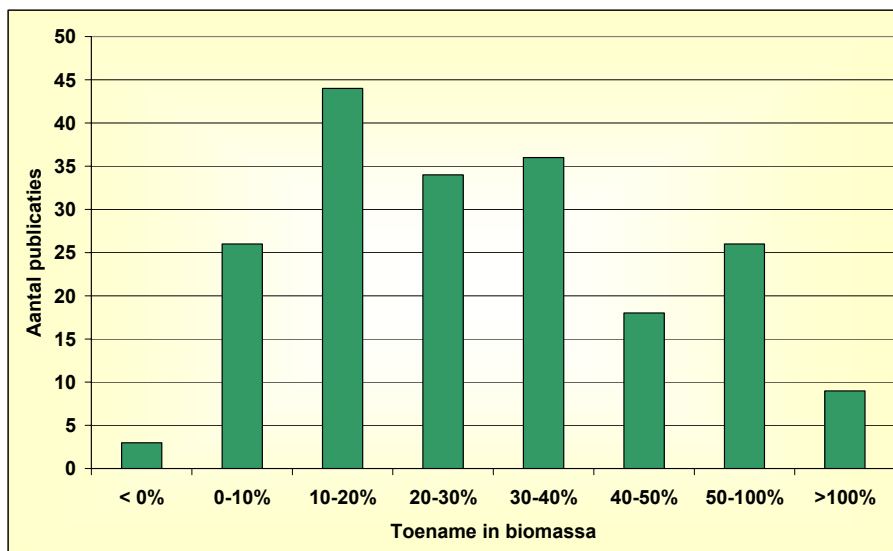
Het is duidelijk dat de verhoogde CO<sub>2</sub> concentratie invloed heeft op gewasgroei. Er zijn hierbij twee processen van belang. Koolstof is een groeistof voor planten en een hogere concentratie kan dus leiden tot een hogere biomassa, meer bladoppervlak en een daarmee gepaard gaande hogere actuele verdamping. Deze verhoging zal nog versterkt kunnen worden door de verhoging van de referentie verdamping als gevolg van stijgende temperaturen. Aan de andere kant zouden planten hun huidmondjes sneller kunnen sluiten omdat aan de koolstofbehoefte sneller wordt voldaan, waardoor juist minder verdamping op zal treden.

KIWA en RIZA (Doomen en Witte, 2004; Witte, et al., 2005; Witte, et al., 2006) hebben literatuur onderzoek uitgevoerd dat zich richt op de invloed van CO<sub>2</sub> op verdamping. De toename van de referentie verdamping door temperatuurstijging duiden zij aan als het temperatuureffect van klimaatverandering. Hogere concentraties CO<sub>2</sub> kunnen leiden tot een hogere biomassa, meer bladoppervlak en een daarmee gepaard gaande hogere verdamping. Anderzijds kunnen planten bij hogere kooldioxideconcentraties makkelijker voldoen aan hun koolstofbehoefte, zodat zij hun huidmondjes minder hoeven te openen of minder huidmondjes hoeven aan te maken, waardoor hun transpiratie wordt gereduceerd. Beide effecten gecombineerd wordt het kooldioxide-effect van klimaatverandering genoemd. De onderzoekers concluderen dat het netto effect zal zijn dat actuele verdamping nog wel zou toenemen, maar minder dan de referentie verdamping zoals genoemd in de KNMI'06 scenario's.

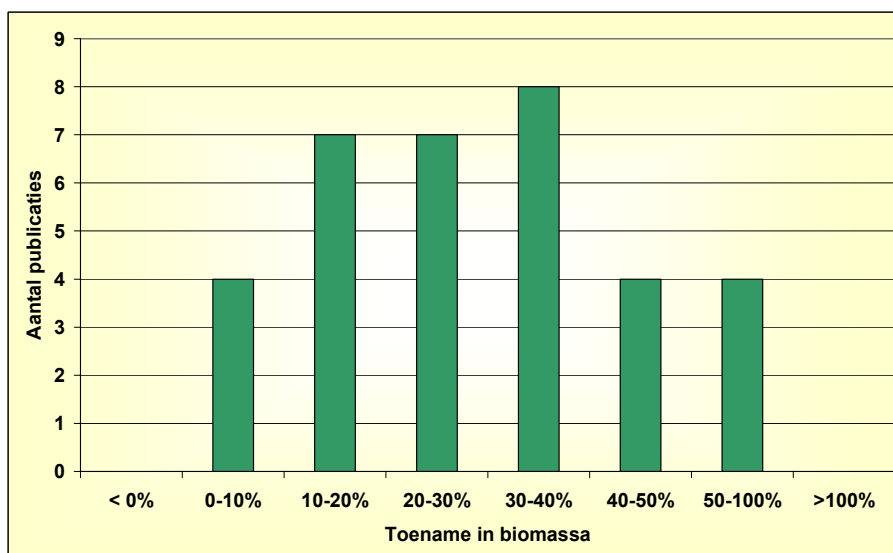
De meeste wetenschappelijke studies laten echter zien dat verhoogde CO<sub>2</sub> niet zozeer verdamping zal remmen, maar vooral de groei zal doen toenemen. Zo wordt in bijna alle Nederlandse kassen de CO<sub>2</sub> concentratie kunstmatig hoog gehouden, om zodoende de productie te verhogen. Het "Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change" in Tempe, Arizona, USA (<http://www.co2science.org/>) verzamelt alle wetenschappelijk literatuur over de invloed van CO<sub>2</sub> op gewassen. Hier blijkt duidelijk uit dat het CO<sub>2</sub> effect op planten vooral een toename in groei zal veroorzaken. Voor tarwe blijkt deze toename aanzienlijk te zijn en in Figuur 31 zijn de resultaten van 197 onderzoeken te zien. Ook voor aardappelen is een toename in biomassa productie waargenomen (Figuur 32). Voor andere gewassen zijn vergelijkbare resultaten gevonden.

Samenvattend zou de voorzichtige conclusie getrokken kunnen worden dat er een zekere consensus bestaat dat indien water aanwezig is, de plant dit vooral zou aanwenden voor een hogere productie.





**Figuur 31. Toename in biomassa bij een CO<sub>2</sub> toename van 300 ppm voor tarwe. Resultaten van 197 publicaties. Bron: <http://www.co2science.org>**



**Figuur 32. Toename in biomassa bij een CO<sub>2</sub> toename van 300 ppm voor aardappelen. Resultaten van 34 publicaties. Bron: <http://www.co2science.org>**







## 6 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie zoals beschreven in dit rapport is het verbeteren van de schatting van de actuele verdamping om zodoende het regionale waterbeheer te ondersteunen in strategische beslissingen. Dit is uitgevoerd door de studie te richten op de volgende drie onderwerpen: (i) aanbevelingen voor de korte termijn, (ii) aanbevelingen voor de lange termijn, en (iii) inventarisatie metingen actuele verdamping.

Het belang voor het onderwerp actuele verdamping komt voort uit het feit dat verdamping, na neerslag, vaak de grootste component van de waterbalans vormt. Daarnaast zal klimaatverandering de vraag naar water doen toenemen en het watertekort, gedefinieerd als de potentiële verdamping minus de actuele verdamping, doen toenemen. Daarnaast is voor de regionale waterbeheerders het juist inschatten van de actuele verdamping essentieel, omdat de neerslag minus de actuele verdamping bepaalt hoeveel water moet worden uitgeslagen. Tenslotte heeft de actuele verdamping, en de juiste bepaling hiervan, invloed op de stofstroom analyse in het kader van de KRW.

In dit rapport zijn bij de betreffende hoofdstukken concrete aanbevelingen gegeven voor zowel de korte als de lange termijn. Aan het eind van dit hoofdstuk worden deze aanbevelingen nogmaals herhaald, met verwijzingen naar de betreffende pagina's in dit rapport. Deze aanbevelingen kunnen worden samengevat tot de vier volgende punten:

- Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten
- Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren
- Referentie verdamping regionaliseren
- Operationeel meten actuele verdamping

### **Bestaande actuele verdampingsmetingen ontsluiten**

In dit rapport is beschreven welke metingen betreffende actuele verdamping zijn uitgevoerd en in hoeverre deze metingen beschikbaar zijn voor de regionale waterbeheerders. Uit deze inventarisatie is gebleken dat er zeer veel metingen zijn uitgevoerd, maar dat slechts een zeer klein gedeelte van deze metingen ook echt ontsloten zijn en direct in een database kunnen worden geplaatst voor algemeen gebruik. Een gedeelte van de geïnventariseerde metingen zijn volgens de verantwoordelijke voor de betreffende meting zo specifiek dat deze nooit in een algemene database kunnen worden opgenomen. Een groot gedeelte van de metingen zou echter wel opgenomen kunnen worden in zo een database, maar vereisen nadere kwaliteitscontrole inclusief het opvullen van ontbrekende dagen. Het is dan ook aan te bevelen om deze metingen op te schonen en te ontsluiten voor verder gebruik.

### **Actuele verdamping in het SWAP model verbeteren**

Het SWAP model wordt algemeen beschouwd als de standaard voor het bepalen van de actuele verdamping. Voor wat betreft de interceptie verdamping is er echter onzekerheid over de nauwkeurigheid en welke concepten en invoergegevens gebruikt moeten worden. Voor bos zijn deze concepten goed uitgewerkt, maar voor landbouwgewassen veel minder. Het belang van deze interceptieverdamping ligt er vooral in dat water dat verdampt door interceptie niet in de bodem komt en dus niet beschikbaar is voor gewas verdamping of moet worden afgevoerd. Als eerste zou een literatuuronderzoek moeten worden gestart naar de grootte van de interceptie in landbouwgewassen. Op grond hiervan kunnen dan de concepten in SWAP en de invoergegevens verbeterd worden.



## Referentie verdamping regionaliseren

De referentie verdamping volgens Makkink wordt momenteel op 20 locaties in Nederland door het KNMI gemeten. Deze gegevens kunnen bij het KNMI worden aangeschaft. Zoals uit dit rapport blijkt, zou er een brede discussie opgestart moeten worden om te evalueren of Makkink nog steeds de meest wenselijke methode is, of dat mogelijk op Penman-Monteith moet worden overgestapt. Een belangrijk aspect hierbij is de gevoeligheid van de referentie methode voor afwijkingen tussen de lokale condities en de meetlocatie. Op grond hiervan kan dan een afweging gemaakt worden wat het gewenste ruimtelijk niveau van deze gegevens is en hoe deze verkregen kunnen worden. Mogelijke opties hiervoor zijn: dichter netwerk van metingen, omzetten van gemeten parameters naar gewenste parameters of het toepassen van remote sensing. Hiervoor moet dan worden gekeken hoeveel de benodigde meetgegevens ruimtelijk afwijken en hoe groot het verschil kan zijn tussen meetlocatie en de locatie waarvoor de referentie verdamping nodig is. Met behulp van geostatistische methoden en remote sensing kan dit worden bepaald. Het uiteindelijke doel van een dergelijke studie is om aanbevelingen te doen hoe de referentie verdamping geregionaliseerd kan worden.

## Operationeel meten actuele verdamping

De verantwoordelijkheid voor het operationeel meten en verspreiden van de actuele verdamping zou aan één instituut moeten worden toegekend. Een voorwaarde hierbij is dat dit dan op een hoge ruimtelijke resolutie zou moeten plaatsvinden, gezien de grote spreiding van de actuele verdamping als functie van bodem, gewas, neerslag, drooglegging etc. Momenteel is er één aanbieder die deze gegevens op een hoge ruimtelijke resolutie aanlevert: WaterWatch in Wageningen. Deze gegevens worden echter niet routinematig door regionale waterbeheerders gebruikt. Het zou wenselijk zijn om een brede discussie te starten of er één organisatie verantwoordelijk kan zijn voor het routinematig verzamelen, opslaan en verspreiden van actuele verdampingsgegevens voor regionale waterbeheerders

Om deze vier punten concreet te maken worden de volgende acties voor de korte termijn aanbevolen:

- Een project starten waarbij bestaande metingen van actuele verdamping worden opgeschoond en in een vrij toegankelijke database worden opgeslagen.
- Een project starten met als doel het concept van interceptieverdamping in SWAP te verbeteren.
- Een studiedag organiseren met twee doelstellingen: (i) discussie Makkink ten opzicht van Penman-Monteith, (ii) routinematig meten van actuele verdamping.

## 6.1 Korte termijn aanbeveling

Hieronder een herhaling van de punten uit de tekst met aanbevelingen voor de korte termijn. Voor verdere uitleg wordt verwezen naar de aangegeven pagina's:

- Voor het bepalen van de openwater verdamping kan beter gebruik gemaakt worden van de Bruin en Keijman methode dan van de Makkink x 1,25 regel. (p. 13)
- Bij het bepalen van de actuele verdamping moet een precieze inschatting gemaakt worden van het totale verhard oppervlak en niet worden uitgegaan van de in statistieken genoemde oppervlakte "stedelijk" of "bebouwd" gebied. Vervolgens kan per landgebruik type de actuele verdamping worden geschat en deze per ratio naar oppervlakte worden gesommeerd tot de totale actuele verdamping. (p. 15)
- Bij het bepalen van de actuele verdamping is het van belang om ook altijd een schatting te maken van de twee componenten gewastranspiratie en bodemverdamping



afzonderlijk. Deze aanbeveling geldt in mindere mate voor hydraulische modellen en is met name belangrijk voor modellen waarbij wateraanvoer in relatie tot gewasgroei wordt geanalyseerd. (p. 16)

- Bij toepassingen waar droogte en dus hoge verdamping van belang zijn kan de referentie verdamping beter met Penman-Monteith worden berekend dan met Makkink. (p. 21)
- Bij het ontbreken van relatieve luchtvochtigheid gegevens kan de dampspanning goed geschat worden uit de minimale temperatuur en een correctie factor voor het dagelijkse temperatuurverschil. (p. 26)
- Een controle van de representativiteit van de meetgegevens op de lokale situatie is noodzakelijk om een betrouwbare referentie verdamping te verkrijgen. Dit geldt vooral voor Penman-Monteith. (p. 27)
- Voor metingen van actuele verdamping over grotere gebieden is remote sensing vanwege de grote ruimtelijke variabiliteit uitermate geschikt. Een praktijk studie waarbij dagelijks vlakdekkende actuele verdamping wordt aangeleverd, zou inzicht kunnen geven over de meerwaarde hiervan voor waterbeheerders. (p. 34)
- Bij gebruik van Penman-Monteith in SWAP kan beter gebruik gemaakt worden van de interne berekening van de referentie verdamping. (p. 50)
- Bij het analyseren van verschillende scenario's is de gebruikte referentie verdamping vaak minder belangrijk. Via een eenvoudige check kan dit voor elke situatie gecontroleerd worden. (p. 55)

## 6.2 Lange termijn aanbeveling

Hieronder een herhaling van de punten uit de tekst met aanbevelingen voor de lange termijn. Voor verdere uitleg wordt verwezen naar de aangegeven pagina's:

- Een onderzoek starten om de nauwkeurigheid van de bepaling van de openwater verdamping te verbeteren. (p. 13)
- Gezien het belang van stedelijke verdamping is het aan te bevelen om op basis van metingen en onderzoek het inzicht te verdiepen in de werking van de stedelijke verdamping. (p. 15)
- Een literatuurstudie opstarten naar interceptieverdamping voor landbouwgewassen en hoe deze beter in modellen is toe te passen. (p. 15)
- Brede discussie opstarten of Nederland de Penman-Monteith methode als standaard moet gaan gebruiken. (p. 21)
- Een uitgebreide analyse uitvoeren om te beoordelen in hoeverre afwijkingen van de lokale condities ten opzichte van de meetlocatie condities de bepaling van de referentie verdamping beïnvloeden. (p. 27)
- Lysimeter metingen starten in Nederland om het onderzoek naar actuele verdamping te verbeteren om zodoende tot nauwkeurigere methoden voor het waterbeheer te ontwikkelen. (p. 30)
- Het opschonen van actuele verdamping metingen uitgevoerd door Alterra om zodoende een database te ontwikkelen die direct klaar is voor gebruik voor waterbeheerders. (p. 39)
- Evalueren of er binnen Nederland één organisatie verantwoordelijk kan worden voor het routinematig meten of metingen verzamelen op het gebied van actuele verdamping. (p. 39)



- Het concept van interceptie verdamping binnen SWAP, waarbij deze geen functie is van de referentie verdamping, zou nader bestudeerd moeten worden. (p. 48)



## 7 Referenties

- Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J. B. Yrisarry, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter, R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81:1–22.
- 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.
- Amatya, D.M., R.W. Skaggs, J.D. Gregory. 1995. Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 121, No. 6.
- Bakel, P.J.T. van, T. Kroon, J.G. Kroes, J. Hoogewoud, R. Pastoors, H.Th.L. Massop, D.J.J. Walvoort, 2007. Reparatie Hydrologie voor STONE 2.1. Beschrijving reparatie-acties, analyseresultaten en beoordeling plausibiliteit.
- Bartholomeus, R.P., Jan-Philip M. Witte, Peter M. van Bodegom, Jos C. van Dam, Rien Aerts Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model *Journal of Hydrology*, Volume 360, Issues 1-4, 15 October 2008, Pages 147-165.
- Bastiaanssen, W.G.M. and H. Roozkrans, 2003. Vlakdekkende actuele verdamping van Nederland operationeel beschikbaar. *Stromingen* 9(4), 5-19.
- Bastiaanssen, W.G.M. and M. Talsma, 2004. Verdroging van Nederland met remote sensing in beeld gebracht. *H2O*(4), 24-26.
- Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman en G. Hiemstra. 2003. Remote sensing ondersteund waterbeheer. STOWA rapport 2003-10.
- Beersma, J., T.A. Buishand. 2002. Droog, droger, droogst: Bijdrage van het KNMI aan de eerste fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie; 199-I.
- Beersma, J., T.A. Buishand, H. Buiteveld. 2004. Droog, droger, droogst: KNMI/RIZA-bijdrage aan de tweede fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie; 199-II.
- Beljaars, A.C.M., F. Bosveld. 1997. Cabauw data for the validation of land surface parameterization schemes. *J. of Climate* 10: 1172-1193
- Bosveld, F., W. Bouten. 2003. Evaluating a model of evaporation and transpiration with observations in a partially wet douglas-fir forest. *Boundary-Layer Meteorology* 108: 365-396.
- Bormann, H. Evaluation of hydrological models for scenario analyses: signal-to-noise-ratio between scenario effects and model uncertainty. *Advances in Geosciences*, 5: 43–48, 2005.
- Bruin, H.A.R. de, J.N.M. Stricker. 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological Sciences-Journal* Vol. 45, No. 3.
- Bruin, H.A.R. de, W.N. Lablans. 1998. Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation. *Hydrological Processes* 12:1053-1062.
- BSIK. 2008. ME1 - Integrated observations and modelling of greenhouse gas budgets at the ecosystem level in the Netherlands. <http://www.climatexchange.nl/projects/bsikme1/index.htm>
- CarboEurope. 2008. Integrated Project CarboEurope-IP Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance. <http://www.carboeurope.org/>
- Cleugh, H.A., E.N. Bui, V.G. Mitchell, J. Xu, C.S.B. Grimmond & D.A.P. Simon. 2005. Evapotranspiration in Urban Water Balance Models: A Methodological Framework. In Zerger, A. and Argent, R.M. (eds) MODSIM 2005 International Congress on Modelling



- and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2005, pp. 170-176.
- David P. Billesbach, Marc L. Fischer, Margaret S. Torn, and Joe A. Berry. 2001. A highly portable, rapidly deployable system for eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> fluxes. (September 19, 2001). Lawrence Berkeley National Laboratory. Paper LBNL-48953.
- De Bruin, H.A.R. 1987. From Penman to Makkink. *Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO* 39: 5-31.
- De Bruin, H.A.R., W.N. Lablans. 1998. Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation. *Hydrological Processes*. Volume 12 Issue 7, Pages 1053 – 1062.
- Doherty, J. 2004. PEST Model-Independent Parameter Estimation. User Manual: 5th Edition. Watermark Numerical Computing.
- Dolman, A.J., E.J. Moors, J.A. Elbers. 1999. Verdamping van kale grond in de winter. *Stromingen* 5(3): 23-34.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24
- Droogers, P., and R.G. Allen. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 33-45.
- Duineveld, M. 2008. Actual evapotranspiration of a pasture according to Penman-Monteith, Makkink and eddy covariance measurements. Thesis Wageningen University.
- ECD. 2008. Ecosystem Component Database. <http://gaia.agraria.unitus.it/DATABASE/carboeuropeip/home.aspx>
- Eertwegh, G.A.P.H. van den; Kroes, J.; Smit, A.; Schaik, F. van. 2003. Peilbeheer met FIW Multi-SWAP. H<sub>2</sub>O (2003) p. 28-31.
- Falge, E. et al. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 43–69.
- Farahani, H.J., T. A. Howell, W. J. Shuttleworth, W. C. Bausch. 2007. Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture. *Transactions of the ASABE*. Vol. 50(5): 1627-1638.
- Feddes, R.A. 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration, in (ed) Hooghart, *Evaporation and weather*, Technical Meeting 44, Ede, 25 maart 1987, Proceedings and Information no. 39, TNO Committee on Hydrological Research, Den Haag: 33- 45.
- Feddes, R.A., G.H. de Rooij and J.C. van Dam (Eds.), *Unsaturated-zone modeling: progress challenges and applications*. Kluwer Academic Publishers. p. 263-299.
- Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke. 1999. Rates of evaporation in urban areas. *Impacts of Urban Growth on Surface and Ground Waters*. International Association of Hydrological Sciences Publication, 259, 235-243.
- Groen, M., H. Savenije. 2003. Interceptie als functie van de maandelijkse regenval. *Stromingen* 9 (2003), nummer 2: 45-48.
- Heijkers, J. en T. Wendt. 2005. Stedelijk-hydrologische modellering. Beleidsmatige problematiek, aanpak en eerste resultaten. *Stromingen* 11 (2005): 43-53.
- Hermans, E., P. Droogers, W. Immerzeel. 2008. Uitbreiding modelinstrumentarium en scenario analyse Quarles van Ufford. FutureWater rapport.
- Irmak, S., A. Irmak, R. G. Allen, and J. W. Jones. 2003. Solar and Net Radiation-Based Equations to Estimate Reference Evapotranspiration in Humid Climates. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 129, 336.
- Itenfisu, D., R.L. Elliott, R.G. Allen, and I.A. Walter. 2003. Comparison of Reference Evapotranspiration Calculations as Part of the ASCE Standardization Effort. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 129, 440.



- Jacobs, C.M.J., A. F. G. Jacobs, F. C. Bosveld, D. M. D. Hendriks, A. Hensen, P. S. Kroon, E. J. Moors, L. Nol, A. Schrier-Uijl, and E. M. Veenendaal. 2007. Variability of annual CO<sub>2</sub> exchange from Dutch Grasslands. *Biogeosciences Discuss.*, 4, 1499–1534, 2007.
- Jansen, H.C., M.E. Sicco Smit & F.J.E. van der Bolt, 2004. *Systeemverkenning Schuitembeek*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 968. Reeks Monitoring Stroomgebieden 2-II. 86 blz. 30 fig.; 18 tab.; 42 ref.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, R.G. Allen (1990) *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE manuals and reports on engineering practice 70, ASCE, New York, 322p.
- Jilderda, R. 2008. Verdamping in Nederland. KNMI. [http://www.knmi.nl/kenniscentrum/verdamping\\_in\\_nederland.html](http://www.knmi.nl/kenniscentrum/verdamping_in_nederland.html).
- Katerji, N., R. Gianfranco. 2008. *Crop Evapotranspiration Measurement and Estimation in the Mediterranean Region*. CRA-SCA. Italy.
- Kite, G.W., and P. Droogers. 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. of Hydrology* 229: 3-18.
- KNMI. 2000. *Klimaatatlas van Nederland. De normaalperiode 1971-2000*.
- KNMI. 2005. *KNMI Handboek Waarnemingen*. <http://www.knmi.nl/samenw/hawa/>
- Koerselman, S. 2001. *Vergelijking verdamping volgens methode Makkink en SEBAL*. Ministerie Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, C.M.J. Jacobs. 2008. *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Alterra Wageningen Report 1649.
- Kroon, T. ; Minnema, B. ; Tiktak, A. ; Veldhuizen, A.A. ; Vergroesen, T. 2006. Een nieuw landelijk hydrologisch instrumentarium. *Stromingen Nummer 12(2006)2*: 49 – 50
- Kruijt, B., Jan-Philip M. Witte, Cor M.J. Jacobs, Timo Kroon. Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology*, Volume 349, Issues 3-4, 1 February 2008, Pages 257-267.
- Lee, X., W. Massman and B. Law (2004). *Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface Flux Measurements and Analysis*.
- Lenderink, G. 2006. *KNMI'06 scenarios: interpolation to monthly changes*.
- Lu, Jianbiao; Sun, Ge; McNulty, Steven G.; Amatya, Devendra. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Journal of American Water Resources Association*. 41(3): 621-633.
- Massop, H.Th.L., P.J.T. van Bakel, T. Kroon, J.G. Kroes, A. Tiktak & W. Werkman. 2005. *Op zoek naar de ware neerslag en verdamping*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1158. Reeks Milieu en Landelijk gebied 28.
- Molden, D. 2008. *Water for food, water for life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London, UK: Earthscan; Colombo, Sri Lanka: IWMI.
- Moors, E.J. 2008. *Evaporation*. In (M.F.P. Bierkens, A.J. Dolman and P.A. Troch, Editors): *Climate and the Hydrological Cycle*. IAHS Special Publications 8, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Pastors, M.J.H. 1992. *Landelijk grondwatermodel; conceptuele modelbeschrijving RIVM november 1992*.
- Priestley, C.H.B., R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81-92.
- Renaud, L.V., Roelsma, J. and Groenendijk, P., 2005. *User's guide of the ANIMO 4.0 nutrient leaching model*. Report 224. Alterra, Wageningen, The Netherlands. 191 pp.
- Roelsma, J., R.A.L. Kselik en J.A. de Vos, 2008. *Watersysteemverkenning Noordelijke Friese Wouden*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1464. 52 blz.; 21 fig.; 7 tab.; 5 ref.
- Samson R (2001) *An experimental and modelling approach to the actual evapotranspiration in a mixed deciduous forest ecosystem (Experimental forest Aelmoeseneie at Gontrode)*.





- Ghent, Belgium: PhD thesis, Ghent University, 294 p. (<http://users.ugent.be/~rsamson/phd/doctoraat.htm>)
- Schaap, J., P. Dik. 2007. MetaSWAP meet zich met SWAP: Simulatie van de onverzadigde zone voor regionale en nationale modellen. *Stromingen* 13 (2007), nummer 3: 15-25.
- Shuttleworth, W.J. 2006. Towards one-step estimation of crop water requirements. *Transactions of the ASABE*. Vol. 49(4): 925-935
- Spieksma, J.F.M. 1998. Rewetting of damaged peatlands. PhD Thesis University Groningen.
- Van Buren, W., P. Kramer, R. de Crook, A. Menkveld. 2008. Een pilotstudie naar de haalbaarheid van het opstellen van deelgebieds-waterbalansen. Toepassing van de methodiek op de data van 2005. Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes. 2008. Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. *Vadose Zone J* 7:640-653.
- Van den Hurk, B. et al. 2006. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands KNMI Scientific Report WR 2006-01.
- Van der Giessen, A. 2005. (ed.) Naar een gezamenlijk nationaal hydrologisch modelinstrumentarium. Eindrapport van de werkgroep Consensus Hydrologie Rapport 500026002/2005 (WUR/Alterra; RIVM/MNP; RWS/RIZA)
- Van der Velde, R. 2004. Comparison between measured and calculated water budgets, a lysimeter study. Wageningen University.
- Van Dijk, A., Moene, A.F., and De Bruin, H.A.R., 2004: The principles of surface flux physics: theory, practice and description of the ECPACK library, Internal Report 2004/1, Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, 99 pp.
- Van Kraalingen, D.W.G., W. Stol. 1997. Evapotranspiration modules for crop growth simulation: implementation of the algorithms from Penman, Makkink and Priestley-Taylor. Ab-DLO, Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 11.
- Van Loon, A., P. Droogers. 2006. Berekening openwaterverdamping. FutureWater rapport.
- Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner, M.F.R. Smit. 2006. SIMGRO 6.0.3 Theory and model implementation. Alterra-report 913.1.
- WaterWatch. 2003. SEBAL vs. Makkink, wat zijn de verschillen? <http://www.waterwatch.nl>.
- Witte, J.P.M. B. Kruijt, C. Maas. 2006. Effecten van CO<sub>2</sub>-toename op verdamping. KIWA: KWR 06.003.
- Yoder, R.E., L.O. Odhiambo, W.C. Wright .2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied engineering in agriculture*, Vol. 21(2): 197-202.





# Appendix 1: Inventarisatie metingen actuele verdamping

**Naam:** Cabauw (Lopik)  
**Lat/lon:** 51.9710 / 04.9270  
**Beheerder:** Alterra/KNMI  
**Status:** Permanent  
**Beschikbaar:** beschikbaar, ontvangen  
**Periode:** 2003-2008  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Castricum (Castricum)  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:**  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** -  
**Methode:** Lysimeter  
**Contact:**

**Naam:** Dijkgraaf (Wageningen)  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** Alterra  
**Status:** Tijdelijk  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** 2006-  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Ede (Ede)  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** Alterra  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** 1988-1989  
**Methode:** BREB  
**Contact:** E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Engbertdijkerven ( )  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** WUR  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** 1988-1989  
**Methode:** Profile method  
**Contact:** E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431/Han Stricker

**Naam:** Fleditebos (Zeevolde)  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** Alterra  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** 1995-1998

**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Fochtelooerveen (Veenhuizen)  
**Lat/lon:** 53.0000 / 06.4000  
**Beheerder:** WUR: Meteorologie  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** -  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:**

**Naam:** Garderen (Garderen)  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** ITC  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** -  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** Bob Su

**Naam:** Garderen ( )  
**Lat/lon:** /  
**Beheerder:** KNMI  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** -  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** F. Bosveld

**Naam:** Haarweg (Wageningen)  
**Lat/lon:** 51.9725 / 05.6381  
**Beheerder:** WUR: Meteorologie  
**Status:** Permanent  
**Beschikbaar:** niet beschikbaar, contact onderzoeker  
**Periode:** 2000-  
**Methode:** Eddy Correlatie  
**Contact:** Bert Heusinkveld

**Naam:** Haarweg (Wageningen)  
**Lat/lon:** 51.9725 / 05.6381  
**Beheerder:** WUR: Meteorologie  
**Status:**  
**Beschikbaar:** onbekend  
**Periode:** 1999-  
**Methode:** Scintilometer  
**Contact:** Oscar Hartogensis; oscar.hartogensis@wur.nl

**Naam:** Haastrecht (Haastrecht)  
**Lat/lon:** 52.0036 / 04.8056  
**Beheerder:** Alterra



Status: Tijdelijk  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2003-2004  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Horstermeer (Nederhorst den Berg)**

Lat/lon: 52.0289 / 05.0675  
Beheerder: VU  
Status: Permanent  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2004-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: H. Dolman / Dimmie Hendriks;  
han.dolman@geo.falw.vu.nl /  
dimmie.hendriks@falw.vu.nl; 020 59 87358

**Naam: Hupsel (Groenlo)**

Lat/lon: 50.0644 / 06.6308  
Beheerder:  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: -  
Methode:  
Contact: Han Stricker/Piet Warmerdam

**Naam: Kampina (Boxtel)**

Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 1996-1998  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Langbroekerwetering ()**

Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: -  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Langerak ()**

Lat/lon: 52.0036 / 04.8056  
Beheerder: Alterra  
Status: Permanent  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2005-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Langeweg ()**

Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status: Tijdelijk

Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2005-2006  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Lelystad (Lelystad)**

Lat/lon: 52.5242 / 05.5516  
Beheerder: ECN  
Status: Permanent  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: -  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: Arjen Hensen; hensen@ecn.nl

**Naam: Loobos (Kootwijk)**

Lat/lon: 52.1679 / 05.7440  
Beheerder: Alterra  
Status: Permanent  
Beschikbaar: beschikbaar, ontvangen  
Periode: 1996-2008  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Lutjewad ()**

Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2006-2007  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam: Lutjewad (Noord Groningen)**

Lat/lon: 53.3889 / 06.3595  
Beheerder: WUR: Meteorologie  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2006-  
Methode: Scintilometer  
Contact: Oscar Hartogensis;  
oscar.hartogensis@wur.nl

**Naam: Lutjewad (Noord Groningen)**

Lat/lon: 53.4036 / 06.3528  
Beheerder: RUG  
Status: Permanent  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2006-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: Wim Klaassen / Rolf Neubert;  
r.e.m.neubert@rug.nl; 050 363 7216

**Naam: Maas-Waal (Batenburg-Leur)**

Lat/lon: 51.8235 / 05.6316  
Beheerder: WUR: Meteorologie  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2003-  
Methode: Scintilometer



Contact: Oscar Hartogensis;  
oscar.hartogensis@wur.nl

**Naam:** Molenweg ()  
Lat/lon: 51.6500 / 04.6391  
Beheerder: Alterra  
Status: Tijdelijk  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2005-2006  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Oukoop (Reeuwijk)  
Lat/lon: 52.0333 / 04.7833  
Beheerder: WUR: Nature conservation & Plant Ecology Group  
Status: Tijdelijk  
Beschikbaar: niet beschikbaar, contact onderzoeker  
Periode: 0-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: Elmar Veenendaal;  
elmar.veenendaal@wur.nl; 0317-483815

**Naam:** Purmerbos (Purmerend)  
Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 1990-2000  
Methode: Waterbalans  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Slotervaart (Den Helder)  
Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2008-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Speuld (Garderen)  
Lat/lon: 52.2651 / 05.6778  
Beheerder: WUR: Meteorologie  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2006-  
Methode: Scintillometer  
Contact: Oscar Hartogensis;  
oscar.hartogensis@wur.nl

**Naam:** Stein (Reeuwijk)  
Lat/lon: 52.0167 / 04.7667  
Beheerder: WUR: Nature conservation & Plant Ecology Group  
Status: Tijdelijk  
Beschikbaar: niet beschikbaar, contact onderzoeker

Periode: 0-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: Elmar Veenendaal;  
elmar.veenendaal@wur.nl; 0317-483815

**Naam:** Utercht (Utrecht)  
Lat/lon: /  
Beheerder: HDSR  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2008-2008  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: Joost Heijkers; heijkers.wjm@hdsr.nl;

**Naam:** Veenhuizen ()  
Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 1995-1997  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Vredepeel ()  
Lat/lon: 51.5317 / 05.8441  
Beheerder: Alterra  
Status: Tijdelijk  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2006-2007  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Zeewolde (Zeewolde)  
Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 2008-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

**Naam:** Zegveld (Zegveld)  
Lat/lon: /  
Beheerder: Alterra  
Status:  
Beschikbaar: onbekend  
Periode: 0-  
Methode: Eddy Correlatie  
Contact: E. Moors; eddy.moors@wur.nl; 0317-486431

