

HOOFDRAPPORT

stowa

Toepassingsmogelijkheden van  
vlakdekkende verdampingsinformatie

# REMOTE SENSING ONDERSTEUND WATERBEHEER



RAPPORT

2003  
10

stowa

# HOOFDRAPPORT

## REMOTE SENSING ONDERSTEUND WATERBEHEER

Toepassingsmogelijkheden van vlakdekkende verdampingsinformatie

RAPPORT

2003

10

ISBN 90.5773.215.7



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 030 232 11 99 FAX 030 232 17 66  
Arthur van Schendelstraat 816  
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

Publicaties en het publicatie overzicht van de STOWA kunt u uitsluitend bestellen bij:  
**Hageman Fulfilment** POSTBUS 1110, 3300 CC Zwijndrecht,  
TEL 078 629 33 32 FAX 078 610 610 42 87 EMAIL info@hageman.nl  
onder vermelding van ISBN of STOWA rapportnummer en een duidelijk afleveradres.

# COLOFON

RAPPORT REMOTE SENSING ONDERSTEUND WATERBEHEER  
Toepassingsmogelijkheden van vlakdekkende verdampingsinformatie

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

De BegeleidingsCommissie bestond uit vertegenwoordigers van wetenschappelijke instituten en waterbeheerders werkzaam bij de betrokken waterschappen:

|                                 |                                    |
|---------------------------------|------------------------------------|
| dr. ir. J.M. Schouvenaars (vz.) | Wetterskip Boarn en Klif           |
| dr. J.V. Witter                 | Hoogheemraadschap van West-Brabant |
| ir. A.C.W. Lambrechts           | Waterschap Rijn en IJssel          |
| ir. H. van Norel                | Waterschap Hunze en AA's           |
| dr. ir. P.J.T. van Bakel        | Alterra                            |
| dr. ir. R. Booij                | Plant Research International       |
| ing. J.M.M. Bouwmans (tot 2001) | Dienst Landelijk Gebied            |
| ir. M.J.G. Talsma               | STOWA                              |

|         |                       |            |
|---------|-----------------------|------------|
| AUTEURS | dr. W.G.M. Bastiaanse | WaterWatch |
|         | ir. E.J.M. Noordman   | WaterWatch |
|         | ir. G. Hiemstra       | WeerOnline |

BEELD WaterWatch

## VISUELE IDENTITEIT

Made of man, visual identity under construction, Rotterdam

### Hoofdrapport

STOWA rapportnummer 2003-10  
ISBN 90.5773.215.7

### Deelrapport - Pilot Studies

STOWA rapportnummer 2003-10a  
ISBN 90.5773.227.0

BESTELLEN Hageman Fulfilment POSTBUS 1110, 3300 CC Zwijndrecht,  
TEL 078 629 33 32 FAX 078 610 42 87 EMAIL [info@hageman.nl](mailto:info@hageman.nl)  
onder vermelding van ISBN of STOWA rapportnummer en een duidelijk afleveradres.

# TEN GELEIDE

Ofschoon er vooruitgang in het academische remote sensing onderzoek voor het kwantitatieve waterbeheer is, wordt er weinig met deze mogelijkheden in de praktijk gedaan. Daar zijn diverse redenen voor aan te geven, maar èèn hoofdzaak is onbekendheid. Om de uitwisseling van kennisaanbod en praktijkvraag te bevorderen, heeft de STOWA het project 'remote sensing ondersteund waterbeheer' opgezet. Bij het formuleren van de inhoud van het project werd door meerdere waterschappen meegedaan die elk hun eigen problematiek en interesse inbrachten. Dit was mede ingegeven door een door de uitvoerders van het project georganiseerde workshop bij DLV-Meteo in Bennekom in het najaar van 1999. Zij hebben ook voor een aanvullende financiering gezorgd.

Het bestaan van diverse wensen, heeft geresulteerd in een brede aanpak van het project waarmee een opsomming van diverse mogelijkheden met concrete voorbeelden tot stand is gekomen. Het is nu aan de waterbeheerders de mogelijkheden in detail te gaan verkennen en om te zetten in implementatie.

Doelbewust is in deze studie gekeken naar aspecten van het voorbereidend waterbeheer (b.v. wijziging peilbesluit, evaluatie boezembeheer, GGOR) en het uitvoerend waterbeheer (b.v. aanvoer gebiedsvreemd water, bodemvochttherstel, beregening). De resultaten staan beschreven in een hoofdrapport 'Remote Sensing Ondersteund Waterbeheer' en een 5-tal afzonderlijke deelrapporten:

- De waterbalans van polders opnieuw bekeken
- Drooglegging en grasgroei van een klei-op-veen gebied
- Bodemvocht en verdrogingsbestrijding in Oost-Gelderland
- Remote sensing als ondersteuning van het peilbeheer in de veenkolonieën
- Naar een satelliet instrumentarium voor beregening

Hun bijdrage aan de discussies en uitvoering van het project is zeer gewaardeerd. Het project werd vanuit de STOWA begeleid door Mevr. ir. M.J.G. Talsma. Tijdens haar afwezigheid heeft ir. M.R.A. Clewits de zaken waar genomen. Het onderzoek is uitgevoerd door het bureau WaterWatch met input van WeerOnline, beiden gevestigd in Wageningen. Het projectteam bestond uit de heren Prof. dr. W.G.M. Bastiaanssen, ir. E.J.M. Noordman en ir. G. Hiemstra.

Utrecht, oktober 2003

De directeur van de STOWA,  
ir. J.M.J. Leenen



# LEESWIJZER

De rapportage van het onderzoek REMOTE SENSING ONDERSTEUND WATERBEHEER bestaat uit een Hoofdrapport en een Deelrapport (met hierin 5 pilot studies). Voor u ligt het Hoofdrapport (2003-10). Het Deelrapport (2003-10-A) bestaat uit:

|                       |  |     |
|-----------------------|--|-----|
| <b>PILOT STUDIE 1</b> | DE WATERBALANS VAN POLDERS OPNIEUW BEKEKEN                             | 1   |
| <b>PILOT STUDIE 2</b> | DROOGLEGGING EN GRASGROEI VAN EEN KLEI-OP-VEEN GEBIED                  | 41  |
| <b>PILOT STUDIE 3</b> | BODEMVOCHT EN VERDROGINGSBESTRIJDING IN OOST-GELDERLAND                | 73  |
| <b>PILOT STUDIE 4</b> | REMOTE SENSING ALS ONDERSTEUNING VAN HET PEILBEHEER IN DE VEENKOLONIËN | 113 |
| <b>PILOT STUDIE 5</b> | NAAR EEN SATELLIET INSTRUMENTARIUM VOOR BEREKENING                     | 151 |

# INHOUD

SAMENVATTING  
STOWA IN HET KORT

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>INLEIDING</b>  | <b>1</b> |
| 1.1      | Algemeen  | 1        |
| 1.2      | Probleemverkenning  | 2        |
| 1.3      | Historie van remote sensing onderzoek voor het waterbeheer in Nederland | 3        |
| 1.4      | Aanleiding  | 4        |
| <b>2</b> | <b>DOELSTELLING</b>   | <b>7</b> |
| 2.1      | Algemeen  | 7        |
| 2.2      | Onderzoeksvragen  | 7        |
| 2.3      | Werkwijze   | 9        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>REMOTE SENSING TECHNOLOGIE VOOR HYDROLOGISCHE TOEPASSINGEN</b>   | <b>13</b> |
| 3.1      | Sensoren  | 13        |
| 3.1.1    | Regenradar  | 13        |
| 3.1.2    | Satelliet sensoren  | 14        |
| 3.2      | Algoritmes  | 15        |
| 3.3      | Validatie   | 17        |
| 3.3.1    | Regenval  | 17        |
| 3.3.2    | Actuele verdamping  | 19        |
| 3.3.3    | Weersvoorspelling   | 23        |
| <b>4</b> | <b>REMOTE SENSING TOEPASSINGEN IN HET WATERBEHEER</b>   | <b>25</b> |
| <b>5</b> | <b>AANBEVELINGEN VOOR IMPLEMENTATIE EN OPLOSSEN KNELPUNTEN</b>  | <b>33</b> |
| 5.1      | Aanbevelingen   | 33        |
| 5.2      | Knelpunten en mogelijke oplossingen   | 34        |
|          | <b>LITERATUUR</b>   | <b>37</b> |
|          | <b>BIJLAGEN</b>   |           |
| <b>1</b> | <b>NAUWKEURIGHEID REGENRADAR NA KALIBRATIE</b>  | <b>41</b> |
| <b>2</b> | <b>VALIDATIE VAN 1 KM NOAA PIXELS OP VERSCHILLENDE TIJDSCHALEN</b>  | <b>43</b> |
| <b>3</b> | <b>VOORBEELD VAN EEN LANGE AFSTAND SCINTILLOMETER METING IN HET GROENE HART</b>   | <b>45</b> |
| <b>4</b> | <b>OVEREENKOMST TUSSEN ACTUELE VERDAMPING VERKREGEN MET<br/>REMOTE SENSING TECHNIEKEN EN MET HET HYDROLOGISCHE MODEL SIMGRO</b> | <b>47</b> |
| <b>5</b> | <b>NAUWKEURIGHEID WEERSVOORSPELLINGEN</b>   | <b>49</b> |
| <b>6</b> | <b>KOSTEN VAN REMOTE SENSING TOEPASSINGEN VOOR HYDROLOGISCHE GROEIPLAATSFACTOREN</b>  | <b>53</b> |

# SAMENVATTING

In het Nederlandse waterbeheer wordt steeds meer naar precisie gestreefd. Enerzijds wordt er landelijk en regionaal beleid voor bijvoorbeeld verdrogingsbestrijding en beregenen ontwikkeld, maar anderzijds blijkt het aan een goed meetinstrumentarium te ontbreken. Er is dus een vraag naar nieuwe informatiebronnen om het waterbeheer te kunnen toetsen. Anderzijds kan remote sensing nu kwantitatief vlakdekkende informatie in beeld brengen. Omdat de vragers niet weten wat het aanbod is en de aanbieders geen notie van de praktijkvragen hebben, wordt er nog weinig met remote sensing technologie in Nederland gedaan.

De spectrale straling waargenomen door sensoren kunnen via algoritmes worden omgezet naar een aantal hydrologische parameters zoals (i) neerslag ( $N$ ), (ii) verdamping ( $ET_{act}$ ), (iii) bodemvocht en (iv) biomassagroei. Hiermee kunnen reeksen van neerslagoverschot ( $N - ET_{act}$ ) en verdampingstekort ( $ET_{pot} - ET_{act}$ ) met voldoende nauwkeurigheid worden vervaardigd. Deze remote sensing parameters zijn in combinatie bekeken en samen getest voor het beschrijven van aspecten in het kwantitatieve waterbeheer. Voor het uitrekenen van deze grootheden is geen informatie over landgebruik noodzakelijk. Dit betekent dat deze hydrologische gegevens voor elke willekeurige pixel kunnen worden uitgerekend. Dat biedt nieuwe mogelijkheden in de hydrologie omdat veel klassieke rekenmethodes op bekend veronderstelde gewas en bodemtypes zijn gebaseerd. Ook kan er beter met ruimtelijke variatie in hydrologische processen worden omgegaan, zodat er een completer beeld ontstaat.

Het blijkt mogelijk om ruimte- en tijdspreiding van het neerslagoverschot te bepalen. Het beschikbaar zijn van de variatie in het neerslagoverschot is een voordeel om daarmee beter de afvoer en aanvoer van water te bepalen. De 15 minuten regenradarbeelden moeten wel worden gekalibreerd m.b.v. regenmeters en daar zijn verschillende technieken voor beschikbaar die verder dienen te worden onderzocht. Naast het neerslagoverschot blijkt dat vooral verdampingstekort nuttig is om droogte- en natschade van landbouw, bos en natuurterreinen te kwantificeren.

De NOAA beelden zijn gebruikt om zowel actuele als potentiële verdamping te bepalen. Er is een methode ontwikkeld om gesommeerde weekwaardes op een operationele wijze af te leiden, ook als er sprake van bewolking is. Deze verdampingsreeks is vooral nuttig gebleken voor het tijdig beslissen over aanvoer van gebiedsvreemd water en het afleiden van de potentiële beregeningsbehoefte. De nauwkeurigheid van verdamping is getest voor de Nederlandse condities en is op weekbasis goed bevonden. De betrouwbaarheid neemt verder toe als er over gebieden en de tijd gemiddeld wordt.

Vanuit de verschillen tussen actuele en potentiële verdamping kan het bodemvocht gehalte worden afgeleid. De resultaten van absoluut vochtgehalte zijn momenteel nog niet robuust genoeg voor operationeel gebruik. Een tijdserie van genormaliseerd bodemvocht is wel geschikt gebleken om veranderingen van bodemvocht over een periode van 7 jaar systema-



tisch vast te stellen. Klimatologische effecten zijn gereduceerd door pixel waardes te normaliseren met de gebiedsgemiddelde waardes. Door gebruik van genormaliseerd bodemvocht kunnen systematische verandering van de natheid in de bovengrond worden vastgesteld. Er kunnen retrospectieve studies tot 1982 terug worden uitgevoerd omdat de beelden zijn gearhiveerd. Over het algemeen moet worden opgemerkt dat het moeilijk is pixel waardes te valideren i.v.m. verschillen in ruimtelijke schaal tussen een pixel en een puntmeting in het veld.

De Landsat beelden zijn gebruikt om voor specifieke percelen en peilvakken de grasgroei, beregeningsbehoefte, GGOR realisatie en uitdroging in het voorjaar te bepalen. De patronen kwamen goed met bedrijfsgrenzen, aanvoersloten en verdrogingsbestrijding gebieden overeen, hetgeen betekent dat kleinschalige verschillen kwantitatief kunnen worden beschreven. Er is geconcludeerd dat Landsat beelden vooral geschikt zijn voor strategische verkenningen van het waterbeheer, omdat het in Nederland ontbreekt aan voldoende onbewolkte thermisch-infrarood beelden voor het maken van tijdseries.

Remote sensing technieken leveren schattingen van de werkelijke regenval en de werkelijke verdamping op, en dat is geen complete waterbalans. De grondwaterstand kan niet uit satelliet metingen worden afgeleid. De verdeling tussen kwel/wegzijging enerzijds en aanvoer/afvoer anderzijds kan ook niet worden bepaald. Synergie tussen remote sensing en hydrologische modellen kan tot een compleet beeld van alle hydrologische processen en de waterbalans leiden.

De uitvoering van het project heeft een aantal verbeteringen in de hydrologische remote sensing modellen teweeg gebracht. Een daarvan is de berekening van de minimale oppervlakteweerstand voor verdamping. Een ander aspect is het afleiden van weekverdamping op basis van dagelijkse KNMI waarnemingen en NOAA metingen van de verdampingsweerstand op onbewolkte dagen. Voor de berekening van bodemvocht voor weken zonder NOAA beeld is een simpele boekhouding van inkomende en uitgaande waterposten ontwikkeld. Deze methode moet verder worden ontwikkeld.

In deze STOWA studie zijn een aantal interessante applicaties samen met de praktijk ontwikkeld. De volgende fase is deze applicaties te implementeren voor het oplossen van specifieke problemen. Informatie moet naar beslissingen worden geconverteerd, en dat kan alleen als er vertrouwen in deze geavanceerde techniek ontstaat en meer praktijkervaring wordt opgedaan.

#### KADER 1

##### **AANBEVELINGEN REMOTE SENSING TOEPASSINGEN IN HET WATERBEHEER**

De mogelijkheden van remote sensing worden niet benut omdat de waterbeheerders niet weten wat ze er mee kunnen doen of er niet in geloven; er zijn pioniers nodig die het aandurven om goede applicaties uit te werken. De huidige studie heeft laten zien dat er potentiële mogelijkheden liggen bij zowel voorbereidend (verdroging, peilbesluit, gewenst grondwater regime) als uitvoerend waterbeheer (aanvoer boezem water, peilbeheer, beregenen). Maar het zijn geen kant-en-klaar oplossingen en die zullen ook nooit gerealiseerd kunnen worden; er blijft altijd een toepassing-afhankelijke component in zitten. Remote sensing is net zoals een hydrologisch model een stuk gereedschap. Het is aan te bevelen nieuwe case studies door een select aantal

waterschappen te laten uitvoeren waarmee het aantal voorbeelden stijgt. Nieuwe projecten moeten in gebieden worden uitgevoerd waar al veel hydrologische data en algemene GIS bestanden beschikbaar zijn. Daarmee kunnen waargenomen fenomenen beter worden verklaard.

Er kunnen operationele producten van regenval, verdamping, verdampingstekorten en biomassagroei voor het gehele land op weekbasis worden gemaakt. Een aanbeveling is deze gegevens in een landelijke database te zetten en toegankelijk voor alle geïnteresseerden te maken. Het is technisch- en financieel interessant om een gebruikersplatform op te richten.

Nader academische remote sensing onderzoek voor het kwantitatieve waterbeheer kan zich het beste richten op het verbeteren van de nauwkeurigheid van het bodemvocht gehalte, vochttopslag in de onverzadigde zone en de daaraan gekoppelde ruimte- en tijdscomponenten van de ondiepe grondwaterstand. Ook is er meer onderzoek nodig om de gesommeerde neerslag uit regenradar beelden goed te krijgen. On-line validatie van verdamping met scintillometers is ook een aanbeveling.

# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. In 2003 zijn dat alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen, de provincies en Rijkswaterstaat.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van behoefteinventarisaties bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen. Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n vijf miljoen euro.

STOWA onderzoeksvelden

- Afvalwateronderzoek
- Watersysteemonderzoek
- Waterketenonderzoek
- Waterweren

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: +31 (0)30 232 11 99.

Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl).

# 1

## INLEIDING

### 1.1 ALGEMEEN

Het Nederlandse waterbeheer is continue in ontwikkeling. Enerzijds is er sprake van een schaalvergroting in beheersgebieden, anderzijds stellen verschillende belanghebbenden specifiekere eisen aan kleinschalige hydrologische systeem. Er worden landelijke richtlijnen ontworpen door projectgroepen zoals het Nationaal Onderzoek Verdroging, Beregenen op Maat en de Projectgroep Waterlood. Door deze acties groeit de behoefte aan vlakdekkende gebiedsinformatie, zowel voor het verkennen van de gemiddelde situatie (b.v. wordt een provincie natter ?) als voor het in kaart brengen van lokale variaties (b.v. is er nat/droogteschade op zeer specifieke locaties ?).

Door de digitalisering in de hydrologie neemt het aantal en de complexiteit van databestanden snel toe. In veel gevallen worden die bestanden uitwisselbaar gemaakt d.m.v. een Geografisch Informatie Systeem (GIS), zodat informatie ruimtelijk inzichtelijk kan worden gemaakt. Met het digitaal voorhanden zijn van informatie kan snel en effectief op vragen vanuit het beleid worden ingespeeld. Door de toenemende mogelijkheden van GIS systemen en het aanwezig zijn van expertise bij waterschappen en provincies, kan vlakdekkende remote sensing een nieuwe informatie bron voor het kwantitatieve waterbeheer zijn. Remote sensing gegevens leveren de invoergegevens voor GIS bestanden.

Deze STOWA studie zal trachten een brug te slaan tussen de wetenschappelijke vooruitgang op het terrein van remote sensing onderzoek voor het kwantitatieve waterbeheer enerzijds en de vragen uit de waterbeheerpraktijk anderzijds. Remote sensing informatie wordt in Nederland nauwelijks gebruikt, enkele door de overheid gefinancierde onderzoeksstudies daargelaten. Dit komt o.a. door onbekendheid met de stand van de techniek door de potentiële gebruikers, en het onbekend zijn met de problemen in het praktische waterbeheer door de remote sensing specialist.

De afgelopen 15 jaar zijn methoden ontwikkeld waarmee op basis van satelliet- en radar-metingen de ruimtelijke verdeling van regenval, verdamping, bodemvocht en biomassa-groei kunnen worden geschat. Dit zijn belangrijke onderdelen van groeiplaatsfactoren, ofschoon èèn enkele parameter niet zoveel betekenis geeft, kunnen ze in onderlinge combinatie en in relatie met de omgeving of in de tijd essentiële kennis vernieuwing opleveren. Voorwaarde is dat de nauwkeurigheid dan wel aan de eisen voldoet.

Recentelijk zijn er een paar state-of-the-art artikelen verschenen die een overzicht van de laatste mogelijkheden op het terrein van remote sensing voor het waterbeheer van het landelijke gebied weergeven (RANGO AND SHALABY, 1998; BASTIAANSEN, 1998; SCHULTZ AND ENGMAN, 2000). Met deze remote sensing informatie over het bodem-water-atmosfeer systeem kunnen belangrijke hydrologische processen worden gekwantificeerd (zie Figuur 1).

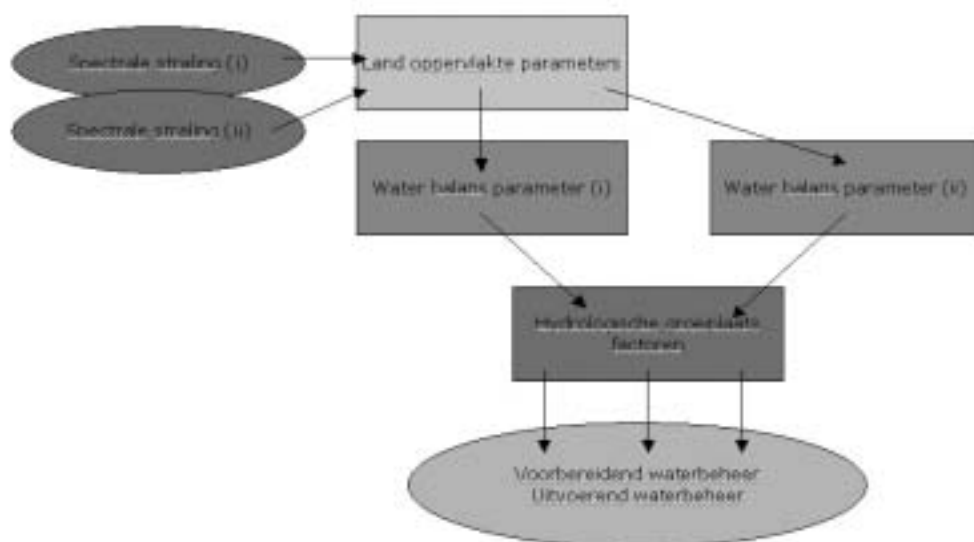
## KADER 1

**ALGEMENE DOELSTELLING REMOTE SENSING PROJECT**

Remote sensing technieken bieden een bron van aanvullende informatie over hydrologische processen. De strekking van de in dit rapport beschreven studie is:

*Het testen of het wetenschappelijk onderzoek naar remote sensing metingen (satelliet en neerslagradar) ver genoeg gevorderd is voor toepassing in de waterbeheerpraktijk.*

Er wordt daarbij een onderscheid gemaakt tussen het gebruik van deze informatie bij strategische studies en bij het operationele waterbeheer



FIGUUR 1 SCHEMATISCHE RELATIE TUSSEN REMOTE SENSING STRALINGSMETINGEN EN TOEPASSINGEN IN HET WATERBEHEER

## 1.2 PROBLEEMVERKENNING

Hydrologische informatie wordt traditioneel via veldmetingen verzameld en is duur omdat er (i) veel arbeid mee gepaard gaat, of (ii) omdat er geavanceerde automatische sensoren moeten worden aangeschaft en geïnstalleerd. Bovendien zijn veldmetingen vaak 'puntmetingen' die onvoldoende representatief zijn voor een groter oppervlak. VAN BAKEL EN BIERKENS (1999) vragen zich dan ook terecht af of het wel mogelijk is peilbeheer af te stemmen op één (of enkele) meetlocaties, en zo ja, waar dit meetpunt dan bijvoorbeeld moet worden ingericht. Puntmetingen kunnen belangrijke fouten veroorzaken bij het opstellen van de waterbalans. Meestal kan de waterbalans met behulp van een beperkte hoeveelheid veldgegevens niet nauwkeurig genoeg in kaart worden gebracht. Zo is er bijvoorbeeld geen operationele meetmethode om de actuele verdamping te bepalen en is aan/afvoer van water door de ondergrond moeilijk te meten. Tabel 1 laat zien welke termen en aan de waterbalans gerelateerde parameters gemeten kunnen worden. Behalve aan- en afvoer kunnen alle metingen als 'puntmetingen' worden beschouwd.

TABEL 1 VERSCHILLENDE BRONNEN VOOR HYDROLOGISCHE INFORMATIE

| Veldmetingen      | Remote sensing metingen |
|-------------------|-------------------------|
| Regenval          | Regenval                |
| Verdamping*       | Verdamping              |
| Bodemvochtgehalte | Bodemvochtgehalte       |
| Grondwaterstand   | -                       |
| Open water peil   | -                       |
| Aan-/afvoer       | -                       |
| -                 | Gewasgroei              |

\* De referentiegewasverdamping is de potentiële verdamping van een standaardgewas en wordt door het KNMI voor de Nederlandse weerstations berekend met de Makkink-methode. Deze referentiegewasverdamping kan aanzienlijk afwijken van de actuele verdamping.

In de praktijk duurt het vaak lang voordat veldmetingen beschikbaar zijn voor verdere verwerking en daardoor voor het ondersteunen van beslissingen. Anno 21e eeuw ontstaan op dit gebied door nieuwe technieken, zoals telemetrie en mobiele telefoons, mogelijkheden om de data-overdracht te versnellen.

### 1.3 HISTORIE VAN REMOTE SENSING ONDERZOEK VOOR HET WATERBEHEER IN NEDERLAND

Diverse fondsen (Nederlandse Interdepartementale Werkgemeenschap voor het Applicatieonderzoek van Remote-Sensingtechnieken, NIWARS, Nationaal Remote Sensing Programma, NRSP) hebben het onderzoek naar de mogelijkheden van remote sensing in het kwantitatieve waterbeheer in de afgelopen 25 jaar gestimuleerd. In kort bestek worden hierna de belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit de onderzoeksperiode (1975 tot 1990) weergegeven. De opsomming voor deze periode heeft betrekking op de volgende studies:

- studieproject Oost-Gelderland (PROJECTTEAM, 1985);
- studieproject ruilverkaveling Ulvenhout-Galder (DROESEN EN JAARSMA, 1990);
- studieproject Waterhuishoudingsplan Drenthe (NIEUWENHUIS, 1992).

Per project lopen de doelstellingen uiteen, maar de algemene onderzoeksvraag was of er informatie over de actuele verdamping, bodemvochtvoorraad, gewasproductie, samenstelling van de natuurlijke vegetatie en de type landbouwgewassen uit vliegtuigscanner-opnamen kon worden verkregen. De focus lag destijds meer op vliegtuigopnamen, omdat satellietbeelden duur waren en er weinig beelden beschikbaar waren.

Voor de studie in Oost-Gelderland werd geconcludeerd dat de verdamping voor standaard akkerbouwgewassen met behulp van vliegtuigscanner-opnamen kan worden uitgerekend. Deze standaardgewassen moeten eerst apart worden geclassificeerd omdat er gewasafhankelijke parameters aan pixels moeten worden toegekend. Het gebruikte TERGRA-model (SOER, 1980) is gevalideerd voor grasland en aardappelen. NIEUWENHUIS ET AL. (1985) hebben op basis van het TERGRA model een simpel remote sensing model ontwikkeld. De betrouwbaarheid van de gewassenkaart beïnvloedt de nauwkeurigheid van de verdampingskartering.

Het invloedsgebied van het onttrekken van freatisch grondwater, kan op een onafhankelijke wijze m.b.v. multispectrale beelden worden vastgesteld. De schade aan landbouwgewassen in termen van verdampingsreducties ten gevolge van verlaging van de grondwaterstand kan met vliegtuigscanner-opnamen worden vastgesteld.

In Drenthe werden remote-sensing opnamen gebruikt in hydrologische model studies. Er werden echter onoverbrugbare verschillen tussen remote sensing en het regionale hydrologische model SIMGRO (QUERNER EN VAN BAKEL, 1989) geconstateerd (NIEUWENHUIS, 1992). Over het algemeen is de overeenkomst met het puntmodel SWAP (FEDDES ET AL, 1978; BELMANS ET AL., 1983) redelijk, maar ook hier treden afwijkingen op als gevolg van onzekerheden in de definities van de onderrand voorwaardes van het SWAP model (BIJKERK, 1992).

## KADER 2

### AANBEVELING REMOTE SENSING TOEPASSINGEN IN HET WATERBEHEER TACHTIGER

#### JAREN

Remote sensing gegevens moeten worden gebruikt in combinatie met bestaande kaarten (bodem-, grondwatertrap- en geohydrologische kaarten) en met hydrologische modelberekeningen. Bij geïntegreerd gebruik van deze technologieën wordt de bruikbaarheid van remote sensing verbeterd.

Na 15 jaar zijn er nagenoeg geen operationele remote sensing toepassingen in het Nederlandse waterbeheer. Dit komt o.a. omdat de mogelijkheden van satellietopnamen voor verdamping alleen in het kader van klimaatstudies zijn uitgevoerd (PELGRUM 2000; SU EN JACOBS, 2001 ) en het niet bij iedereen bekend is dat dure vliegtuigopnamen (€ 10.000,- tot € 45.000,- per vlucht) niet langer noodzakelijk zijn.

Andere redenen zijn:

- de verdampingsberekeningen volgens de methode Nieuwenhuis et al. (1985) zijn afhankelijk van het type landgebruik en kunnen slechts voor homogene gebieden worden toegepast;
- er is een forse hoeveelheid veldinformatie noodzakelijk zoals oppervlakte-temperatuur, gewastype en gewashoogte om remote sensing algoritmes toe te passen;
- de toepassing vereist specialistische wetenschappelijke kennis die bij adviesbureaus niet beschikbaar was. Studies werden daarom alleen op de Wageningense en Delftse kenniscentra uitgevoerd;
- de computer- en beeldverwerkings capaciteit was destijds beperkt. Met de opkomst van het IT tijdperk is dit probleem vanzelf opgelost

## 1.4 AANLEIDING

De discussie over 'waterbeheer op maat' heeft een breed debat over informatiebehoefte bij het waterbeheer op gang gebracht. De centrale vraag is hoe je beter kunt beheren en ruimtelijk meer diversiteit in het beheer kunt aanbrengen. Dit is niet triviaal indien de meeste hydrologische informatie op puntmetingen is gebaseerd.

In de periode 1990 tot heden heeft praktisch georiënteerd remote sensing onderzoek in

Nederland minder aandacht gekregen. Er is meer aandacht naar theoretische aspecten gegaan (b.v. VERHOEF, 1998; DE VRIES, 1999; VAN OEVELEN, 2000; VAREKAMP, 2001; AHMAD, 2002). Met de diverse academische dissertaties in het binnen- en buitenland zijn er nieuwe, op remote sensing gebaseerde, rekentechnieken beschikbaar gekomen die het waard zijn te testen op hun implementatie mogelijkheden.

De STOWA concludeerde bij de aanvang van het project in april 1999 dat een groot draagvlak binnen de waterschapswereld belangrijk is om de praktische haalbaarheid van remote sensing als informatievoorziening te testen. STOWA adviseerde het project breed aan te pakken, zodat het leidt tot algemene uitspraken over de technisch-financiële mogelijkheden van het gebruik van remote-sensing-technieken bij ondersteuning van het Nederlandse waterbeheer, zowel voor het ondersteunen van dagelijkse beslissingen (online) als mede retrospectief om her-analyses mogelijk te maken (offline).





# 2

## DOELSTELLING

### 2.1 ALGEMEEN

Dit STOWA project 'REMOTE SENSING ONDERSTEUND WATERBEHEER' heeft als doel aan te geven of en hoe remote sensing metingen voor het Nederlandse waterbeheer kunnen worden ingezet, zodanig dat het kwantitatieve beheer nauwkeuriger en beter kan worden uitgevoerd. De waarde dient te worden geverifieerd in de waterbeheerpraktijk.

De specifieke doelstellingen van dit project zijn:

- vergroten van het inzicht in de potentiële mogelijkheden van op remote sensing gebaseerde kaartvlakinformatie van neerslag, verdamping, bodemvocht en biomasagroeï bij het waterbeheer. De toepasbaarheid dient te worden getoetst op de verschillende fasen in het waterbeheer: voorbereidend en uitvoerend;
- verbeteren van het inzicht in de concrete voordelen die het gebruik van op remote sensing gebaseerde vlakinformatie oplevert ten opzichte van conventionele data collectie methoden;
- vergroten van het inzicht in de nauwkeurigheid van de remote sensing informatie ten opzichte van huidige informatie;
- beter inzicht krijgen in de knelpunten die optreden bij toepassen van remote sensing informatie in de praktijk, evenals het doen van aanbevelingen om deze knelpunten op te lossen;

### 2.2 ONDERZOEKSVRAGEN

De onderzoeksvragen zijn opgesteld door de leden van de gebruikerscommissie die een weerspiegeling zijn van de waterbeheerpraktijk (vier commissieleden werken bij waterschappen) en de onderzoekscentra (Alterra, Plant Research International, Dienst Landelijk Gebied). De onderzoeksvragen zoals weergegeven in Tabel 2 zullen d.m.v. de uitvoering van vijf pilots worden beantwoord.

De toegevoegde waarde van remote sensing voor het waterbeheer kan op verschillende wijze worden geïnterpreteerd:

- de nauwkeurigheid kan worden getoetst aan de hand van absolute verschillen tussen veldmetingen en uit remote sensing berekende waardes;
- het verschil in de kwantificering van de hydrologische processen met- en zonder remote sensing metingen;
- de evaluatie van extra inzichten die voorheen niet bekend waren;
- de snelheid in het beschikbaar zijn van informatie over hydrologische processen en groeiplaatsfactoren.

Om deze criteria te toetsen, zijn in de pilot studies verschillende aspecten belicht: voorbereidend vs. uitvoerend waterbeheer en hoge vs. lage resolutie beelden.

TABEL 2 ONDERZOEKSVRAGEN

| ONDERZOEKSVRAAG   | METHODIEK  | CRITERIUM  |
|---|--|--|
| <p><b>1 Bieden remote sensing metingen de mogelijkheid vlakdekkende informatie van regenval, actuele verdamping en bodemvocht voor verschillende vormen van landgebruik te kwantificeren?</b></p>     | <p>NAUWKEURIGHEID verdampingsschattingen valideren tegen eddy correlatie fluxen, radarbeelden met regenmeters, bodemvocht met Time Domain Reflectometers (TDR).</p> <p>KOSTENEFFECTIVITEIT vergelijken huidige kosten dataverzameling van regenval, open water peilen en grondwaterstanden met de kosten verbonden aan remote sensing studies.</p> | <p>Nauwkeurigheid is acceptabel als 90% van remote sensing schattingen binnen de foutenmarge van de huidige veld meetmethodes liggen.</p> <p>De prijs moet lager zijn dan de kosten verbonden aan het conventioneel vergaren van hydrologische informatie.</p>                                   |
| <p><b>2 Kunnen remote sensing beelden de hydrologische gewasgroeicondities beter in kaart brengen dan conventioneel vergaarde metingen van open waterpeil en grondwaterstand?</b></p>                 | <p>Vergelijken van peilen, grondwaterstanden en remote sensing metingen.</p>   | <p>Er is sprake van een verbetering als remote sensing gegevens de gewasgroeicondities voldoende nauwkeurig kunnen beschrijven en open waterpeilen en grondwaterstanden dat niet kunnen.</p>   |
| <p><b>3 Ontstaat door het gebruik van remote sensing informatie een ander hydrologisch inzicht en zijn er consequenties voor het opstellen van toekomstige inrichting- en beheersstrategieën?</b></p> | <p>Waterbalans uitgerekend op basis van conventionele schattingen van de regionale verdamping wordt vergeleken met een waterbalans gebaseerd op remote sensing metingen.</p>   | <p>Er is sprake van een verandering als dat tot andere besluiten in het waterbeheer leidt.</p>   |
| <p><b>4 Kan remote sensing operationeel worden ingezet om wekelijkse waterbeheer besluiten te ondersteunen?</b></p>   | <p>Vergelijken van het aantal noodzakelijke en geleverde beelden.</p>  | <p>Regelmatige levering van weekbeelden doordat wolkeloze dagen gemiddeld eens in de week of per 2 weken voorkomen en het waterschap handelen kan volgens de aangeleverde informatie.</p>  |
| <p><b>5 Wat is de toegevoegde waarde van ruimtelijke gedistribueerde weersverwachtings-informatie?</b></p>  | <p>Vergelijken van voorspelde regenval en referentie-gewasverdamping met de achteraf werkelijk opgetreden waardes.</p>   | <p>De afwijking van gebiedstotalen tussen voorspellingen en waarnemingen over een korte termijn periode van 48 uur mag niet meer dan 50% bedragen en de voorspellende factor moet van doorslaggevende betekenis zijn geweest in de besluitvorming omtrent beregening, versneld uitmalen etc.</p> |
| <p><b>6 Wat zijn de vereiste ruimte- en tijdsresoluties van vlakdekkende informatie voor de diverse toepassingen in het waterbeheer?</b></p>  | <p>Vergelijken wensen van het waterschap met het aanbod van remote sensing gegevens.</p>   | <p>Als het te beheersen gebied (b.v. peilvak, grondwaterwinning) de grootte van een pixel resolutie overtreft is er voldoende spatiale detaillering.</p>   |

### 2.3 WERKWIJZE

Om de onder 2.2 genoemde onderzoeksvragen te beantwoorden is gekozen voor een opzet met meerdere pilot studies:

- PILOT 1** Hoogheemraadschap van West-Brabant;
- PILOT 2** Wetterskip Boarn en Klif;
- PILOT 3** Waterschap Rijn en IJssel;
- PILOT 4** Waterschap Hunze en Aa's;
- PILOT 5** Beregeningscondities op landelijke schaal

De 4 waterschappen zijn landelijk over 6 provincies verdeeld (Groningen, Friesland, Drenthe, Overijssel, Gelderland en Noord-Brabant). Het betreft relatief grote waterschappen. Zo heeft Hunze en Aa's 200.000 ha en Rijn en IJssel 230.000 ha onder haar beheer. Het zijn grote organisaties die zijn uitgerust met moderne middelen zoals de GIS informatie verspreiding via intranet. De pilot gebieden zijn in Figuur 2 weergegeven.



FIGUUR 2 LIGGING VAN DE BETROKKEN WATERSCHAPPEN BIJ DE UITVOERING VAN DE PILOT STUDIES

#### PILOT STUDIE 1

##### **HOOGHEEMRAADSCHAP VAN WEST-BRABANT: WATERBALANS MARK-VLIET-BOEZEM**

Bij het opstellen van de waterbalans van de Mark-Vliet-boezem zijn de gewasverdamping en de verdamping van natuurterreinen onbekende factoren, waardoor de hoeveelheid water die naar de atmosfeer verdwijnt, niet goed kan worden gekwantificeerd. Kwel/wegzijging en aanvoer/afvoer van water worden samen met de verdamping als èèn totale waarde beschouwd, waardoor de hydrologische componenten van de waterbalans onbekend zijn. Indien de verdamping expliciet kan worden vastgesteld, kan daarmee de wenselijkheid tot het aanvoeren van gebiedsvreemd water worden geanalyseerd. Bij deze pilot wordt gekeken hoe de waterbalans in elkaar steekt en of er ingrepen nodig zijn in het toekomstige waterbeheer.

De resultaten van deze studie zijn te vinden in de pilot studie

DE WATERBALANS VAN POLDERS OPNIEUW BEKEKEN

**PILOT STUDIE 2****WETTERSCHIP BOARN EN KLIF: VOORBEREIDING PEILBESLUIT KLEI-OP-VEEN-GEBIED**

Wetterskip Boarn en Klif is bezig een voorbereidend peilbesluit voor typische klei-op-veen situaties te nemen. Ofschoon men het concept van grondwatergerelateerd peilbeheer wil navolgen, bestaat er geen eenduidigheid over het gewenste zomerpeil. Het gebied Wollegaast, gelegen aan het Slotermeer, heeft een sterk variërende ontwateringsbasis. De effecten van drooglegging op verdamping en grasgroei staan ter discussie. De ruimtelijke spreiding van bodemvocht, grasverdamping en grasgroei is niet eenvoudig in het terrein te meten. Door de GIS bestanden van zomerpeil, maaiveldshoogte en remote sensing informatie over biomassagroei te combineren wordt verwacht hierin een beter inzicht worden verkregen. Voor het jaar 1995 zal zowel gekeken worden of er met lage en hoge resolutie informatie uitspraken gedaan kunnen worden over de optimale ontwateringsbasis.

De resultaten van deze studie zijn te vinden in de pilot studie  
DROOGLEGGING EN GRASGROEI VAN EEN KLEI-OP-VEEN GEBIED

**PILOT STUDIE 3****WATERSCHAP RIJN EN IJSSEL: WATERCONSERVERING DEKZAND-LANDSCHAP**

In het begin van de jaren negentig heeft de provincie Gelderland een uitgebreid onderzoek gedaan naar verdroging binnen de provincie. Met name op de hoger gelegen zandgronden is de grondwaterstand gedaald; in de lagere delen zijn kwelstromen afgenomen of verdwenen. Het waterschap probeert de watertekorten te verminderen met verdroging bestrijdende maatregelen. Hiervoor worden stuwpeilen permanent of in gedeelten van het jaar verhoogd. De verhoging van stuwpeilen gebeurt vroeg in het jaar en kan in bepaalde gevallen leiden tot landbouwschade. Daartoe wordt in bepaalde gebieden een samenhangende set van maatregelen uitgevoerd en worden de effecten de eerste jaren na het uitvoeren van een project intensief gemonitord. Het resultaat van dit vernattingsproces wordt via peilbuizen gemeten. De mogelijkheden van aanvullende informatie via remote sensing dient te worden onderzocht.

De resultaten van deze studie zijn te vinden in de pilot studie  
BODEMVOCHT EN VERDROGINGSBESTRIJDING IN OOST-GELDERLAND

**PILOT STUDIE 4****WATERSCHAP HUNZE EN AA'S: OPERATIONEEL PEILBEHEER VEENKOLONIËN**

Het waterschap Hunze en Aa's voert in grote delen van de Veenkoloniën een grondwaterstandafhankelijk peilbeheer. Dit houdt in dat de oppervlaktewaterpeilen worden ingesteld op basis van grondwaterstanden. Welke peilen ingesteld moeten worden (het adviespeil) wordt berekend met behulp van het computerprogramma SWW (Simulatie Waterbeheer Waterschappen). Dit computerprogramma berekent het adviespeil op basis van de gesimuleerde grondwaterstand en verdampingstekorten (VAN BAKEL, 1986). De peilbeheerders beoordelen dit adviespeil en kunnen hiervan afwijken op grond van specifieke gebiedskennis en weersvoorspellingen. Het STW model heeft een beperkte gebiedsdekking. Er zal een vergelijking worden gemaakt tussen de remote sensing informatie en de modelresultaten. De voor- en nadelen van beide methoden zullen worden beschreven.

De resultaten van deze studie zijn te vinden in de pilot studie  
REMOTE SENSING ALS ONDERSTEUNING VAN HET PEILBEHEER IN DE VEENKOLONIEËN

#### PILOT STUDIE 5

##### **BEREGENING**

Gedurende het groeiseizoen, als het een aantal dagen achter elkaar droog en warm is, zakt de grondwaterstand en droogt het bodemvochtprofiel uit. Zolang er voldoende oppervlakte- en grondwater is, kan er beregend worden en het vochttekort voor de landbouw worden aangevuld. Bij teveel beregening kan er een watertekort ontstaan met onwenselijke dalingen van de oppervlakte- en grondwaterstand tot gevolg. Waterschappen en provincies kunnen een verbod tot beregenen afkondigen dat geldig is voor de rest van het jaar. De beslissingen voor boeren om te gaan beregenen en de overheid om over te gaan tot het afkondigen van een verbod, dienen beiden te worden onderbouwd. Objectieve remote sensing informatie over het neerslagoverschot en verdampingstekort als hulpmiddel voor droogte en afvoer zal worden gedemonstreerd.

De resultaten van deze studie zijn te vinden in de pilot studie  
NAAR EEN SATELLIET INSTRUMENTARIUM VOOR BEREGENING



# 3

## REMOTE SENSING TECHNOLOGIE VOOR HYDROLOGISCHE TOEPASSINGEN

### 3.1 SENSOREN

De verschillende sensoren kunnen worden onderscheiden naar elektromagnetische straling (EM) die ze waarnemen en het detail waar dat mee gebeurt. Kan de sensor meerdere delen van het spectrum afzonderlijk waarnemen, dan spreekt men van banden. Sensoren met zichtbare licht en infra-rood band zijn optische sensoren. Radar sensoren meten in het microgolf gedeelte van het EM spectrum. Voor meer achtergrond informatie over remote sensing in het algemeen wordt verwezen naar JANSSE EN DE BOER (1987) en naar BUITEN EN CLEVERS (1990). Voor algemene Nederlandse voorbeelden over remote sensing in het waterbeheer kan men in HOOGHART (1989), VAN DIJK EN BOS (1999) en STOWA (2002) terecht.

#### 3.1.1 REGENRADAR

Het KNMI heeft twee radarsystemen voor het meten van de neerslag, één in De Bilt en één in Den Helder. Deze radars zenden en ontvangen EM-straling met een frequentie van ongeveer 6 GHz en een golflengte van rond de 5 cm. Het meetprincipe van de neerslagradar bestaat uit het meten van de mate waarin de uitgezonden straling wordt verstrooid (teruggekaatst) door neerslagdeeltjes in de lucht. Hoe meer straling er wordt verstrooid, hoe groter de neerslagintensiteit is en, hoe groter het tijdsverschil tussen zenden en ontvangen, hoe verder de neerslag van het radarsysteem verwijderd is. De neerslagintensiteit geeft aan hoeveel millimeter regen er zou vallen als het een uur lang onafgebroken met dezelfde intensiteit regent, ijzelt, sneeuwt of hagelt.

Tijdens een scan maakt de antenne van de radar bij een aantal elevaties (kanteling ten opzichte van horizontaal) een volledige omwenteling om zijn verticale as. Bij iedere stand van de antenne wordt de radarreflectiviteit als functie van de afstand opgemeten. Uiteindelijk levert dit een beeld op van de drie-dimensionale reflectiviteitsverdeling in de atmosfeer. De radars van het KNMI maken elke 5 minuten een kleine scan over 4 lage elevaties en elke 15 minuten een grote scan over in totaal 14 elevaties tot een maximum van 12 graden. De bekende radar neerslagplaatjes zijn niets anders als een horizontale doorsnede door de drie-dimensionale data van de kleine scan.

Een nieuwe toepassing van de neerslagbeelden is om deze in kwantitatieve zin te gebruiken voor het maken van dagelijkse neerslagsommen en wekelijkse neerslagoverschotten (na integratie met verdamping). Het principe is gebaseerd op het integreren van de neerslagbeelden in de tijd (optellen). Ten opzichte van de traditionele regenmeters is zou dit een



grote verbetering. Eén van de grote nadelen van het gebruik van regenmeters is dat het inzicht in de ruimtelijke verdeling van de neerslag slecht is. Een bui die precies over een regenmeter trekt geeft een overschatting van de neerslag over een groter gebied. Het omgekeerde geval: een bui die tussen de regenmeters doortrekt wordt niet 'gezien' zodat de waarnemingen van de regenmeters een onderschatting geven van de gebiedsneerslag.

Bij het KNMI is een methode in ontwikkeling om systematische fouten in de regenradar beelden te corrigeren. Deze techniek was ten tijde van het uitgevoerde onderzoek echter nog niet beschikbaar voor gebruik in de praktijk. Bij dit onderzoek is daarom gebruik gemaakt van de ongecorrigeerde gesommeerde radarbeelden. De beelden hebben een ruimtelijke resolutie van 2,5km die naar 1km is terug gebracht om deze naadloos bij de NOAA-AVHRR satellietbeelden te laten aansluiten.

### 3.1.2 SATELLIET SENSOREN

In dit STOWA project is gebruik gemaakt van 2 satellietgegevens; (Enhanced) Thematic Mapper (ETM) op Landsat en de Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) op de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Het voordeel van de NOAA is dat er elke dag en nacht een beeld wordt opgenomen. Het KNMI beheert een eigen NOAA ontvangststation waardoor beelden in principe na overkomst van de satelliet meteen beschikbaar zijn. De hoge opname frequentie geeft meer kansen om een beeld in onbewolkte toestand te verkrijgen. Dit project heeft aangetoond dat er ongeveer 25 onbewolkte beelden per jaar kunnen worden opgenomen.

De beelden moeten na ontvangst geometrisch gecorrigeerd worden naar het in Nederland geldende coördinatensysteem, het zogenaamde Systeem van de Rijksdriehoeksmeting (RD). Daarbij zijn de oorspronkelijke resoluties teruggebracht naar 25m (Landsat) en 1000m (NOAA). Tabel 3 geeft een overzicht van de algemene sensor specificaties.

TABEL 3 ENKELE EIGENSCHAPPEN VAN SENSOREN DIE BELANGRIJK ZIJN VOOR HET WATERBEHEER

| sensor | satelliet | pixel en beeldgrootte | opname frequentie | parameter  | aanschaf prijs ruw beeld bij commerciële dealer |
|--------|-----------|-----------------------|-------------------|--|---|
| ETM    | Landsat   | 30m - 180km           | elke 16 dagen     | actuele verdamping, verdampingstekort, biomassagroei, biomassavocht. | tussen € 600 en € 1500 per beeld                |
| AVHRR  | NOAA      | 1100m - 2800km        | dagelijks         | idem   | € 10.000 per jaar <sup>1</sup>                  |
| Radar  | n.v.t.    | 2500m - 400km         | elke 5 minuten    | regenval   | € 60.000 per jaar                               |

<sup>1</sup> Dit is de prijs die het KNMI per ingang van 1 januari 2003 rekenend. De ruwe gegevens zijn ook vrij downloadable van internet

## 3.2 ALGORITMES

### STRALING

Natte en donkere oppervlaktes absorberen veel straling en reflecteren weinig. 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. De NOAA en Landsat 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 algoritmes kan deze kwalitatieve informatie naar een kwantitatieve schatting worden omgezet.

Via een complexe rekentechniek wordt de straling gemeten door de ETM en AVHRR sensoren omgezet naar energie fluxen. Dit gebeurt via het zogeheten Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) wat o.a. beschreven staat in BASTIAANSEN (1995, 2000) en BASTIAANSEN ET AL. (1998). Met SEBAL worden de verschillende termen van de oppervlakte energiebalans gekwantificeerd op basis van stralingsmetingen. Dit betekent dat het landgebruik niet bekend hoeft te zijn. SEBAL is geschikt voor zowel Landsat als NOAA beelden omdat beiden een thermisch infrarode band hebben. SEBAL volgt de principes van de standaard Monin-Obukhov theorie die het proces van warmte-uitwisseling, wrijvingssnelheden en thermische convectie in het overgangsgebied tussen land en atmosfeer beschrijft (Brutsaert, 1982). De energiebalans van het landoppervlak bestaat uit de volgende termen:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (W \text{ m}^{-2})$$

|             |  |
|-------------|--|
| $R_n$       | netto straling, hoeveelheid energie die aan het landoppervlak beschikbaar is |
| $G_0$       | bodemwarmte flux, opwarming van de bovengrond                                |
| $H$         | voelbare warmteflux, opwarming van de luchtlaag boven maaiveld               |
| $\lambda E$ | latente warmteflux, verdamping   |

De latente warmte flux is de hoeveelheid energie die gepaard gaat met de verdamping van water. De  $R_n$ ,  $G_0$  en  $H$  fluxen worden geschat uit de spectrale straling en de resterende energie wordt aan verdamping toegeschreven ( $\lambda E = R_n - G_0 - H$ ). Het grote voordeel 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 een remote sensing meting. Ook voor pixels met een heterogeen landgebruik kan de verdamping worden uitgerekend.

### ACTUELE VERDAMPING

De latente warmte flux ( $\lambda E$ ) levert een schatting van de actueel optredende verdamping vanuit de bodem, het blad en het water op (dus inclusief interceptie water). Deze waarde kan aanzienlijk afwijken van de potentiële en referentiegewasverdamping. De conversie van energie ( $W/m^2$ ) naar verdamping (mm/d) geschiedt op basis van de dichtheid van water en de latente energie (J) om één kg water te laten verdampen. Deze conversie factoren zijn nage-

noeg constant. Via inversie van de Penman-Monteith vergelijking kan de actuele oppervlakte weerstand voor verdamping ( $r_s$ ) worden berekend. Dit is de belangrijkste verdampingsparameter:

$$\lambda E = (s_a R_n + \rho_a c_p \Delta e / r_a) / (s_a + \gamma (1 + r_s / r_a)) \quad (\text{W/m}^2)$$

waar  $s_a$  (mbar/K) de helling van de verzadigde damp spanningscurve is,  $\rho_a c_p$  ( $\text{J/m}^3 \text{K}$ ) is de warmtecapaciteit van lucht,  $\Delta e$  (mbar) is het damp spanningstekort,  $\gamma$  (mbar/K) is de psychrometrische constante en  $r_a$  (s/m) is de aerodynamische weerstand. De SEBAL energiebalans berekeningen kunnen alleen worden uitgevoerd als de satellietbeelden onbewolkt zijn. Het resultaat van  $\lambda E$  wordt dan gebruikt om  $r_s$  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 (FARAH, 2001). Daar is een landelijk netwerk van meteorologische waarnemingen van luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid en zonnestraling voor nodig. Deze meteorologische gegevens zijn op dagbasis voor 32 stations van het KNMI verkregen. Op deze wijze kan de berekende actuele verdamping op één dag gebruikt worden om een schatting te maken van de werkelijk optredende verdamping voor de NOAA satelliet voor elke dag van de week. Daaruit zijn voor dit project gesommeerde weekwaardes afgeleid.

#### BODEMVOCHT

De verdeling van de energie tussen voelbare warmte voor het opwarmen van de lucht ( $H$ ) en verdamping ( $\lambda E$ ) is een goede maat voor het bodemvocht. Bij een natte bodem zal de Bowen ratio ( $H/\lambda E$ ) laag zijn ( $\lambda E \gg H$ ). In het tegenover gestelde geval ( $H \gg \lambda E$ ) is de bodem droog. Er is een analytisch verband in eerdere studies ontwikkeld die dit gedrag tussen energie flux verhoudingen en bodemvocht beschrijft (BASTIAANSEN, 1995; SCOTT ET AL., 2003). Omdat de verdeling van de ( $H$ ,  $\lambda E$ ) fluxen voor elk pixel bekend is, kan een schatting van het relatieve vochtgehalte in de wortelzone worden gemaakt. Het relatieve vochtgehalte is de vulingsgraad van de bodem en is gelijk aan het absolute vochtgehalte (op volume basis) gedeeld door de bodemporositeit. Voor grasland zal het relatieve vochtgehalte de condities in de eerste 25 cm weergeven terwijl dat voor een bosopstand tot enkele meters kan oplopen.

Waterbeheerders willen vaak het vochtgehalte in de wortelzone weten omdat dat de natheid voor natuur, bos en landbouwvegetatie aangeeft. Dat is nu precies de waarde die uit de remote sensing metingen volgt. Het nadeel is echter dat eerst informatie over de worteldiepte noodzakelijk is om iets over de totale hoeveelheid (mm) voor de plant beschikbaar bodemvocht te zeggen.

Voor bewolkte dagen wordt het vochtgehalte uitgerekend via een boekhoudmethode die het verschil tussen inkomende (regen) en uitgaande (verdamping) waterstromen bijhoudt. Feitelijk betekent dit dat voor ongeveer 25 onbewolkte dagen per jaar bodemvocht rechtstreeks uit de NOAA beelden wordt afgeleid (7 %) en voor alle andere dagen (93 %) uit een simpel bodemvocht model.

### POTENTIËLE VERDAMPING EN VERDAMPINGSTEKORT

De potentiële verdamping wordt met behulp van de Penman-Monteith vergelijking uitgerekend. De oppervlakteweerstand voor verdamping van een pixel zonder enig vochttekort ( $r_s^{\min}$ ), wordt uitgerekend aan de hand van de bladerindex (LAI) en een minimale huidmondjes weerstand (niet volgens SEBAL) want het werkelijke vochtgehalte doet niet ter zake in het geval van potentiële gewasverdamping. Effecten voor extreme temperatuur, dampspanningstekort en zonnestraling op de waarde van  $r_s^{\min}$  zijn in rekening gebracht. Dit is in de literatuur bekend als het Jarvis-Stewart concept.

Het verschil tussen de actuele en potentiële verdamping ( $ET_{\text{pot}} - ET_{\text{act}}$  is verdampingstekort) is een goede maat voor de droogte- en natschade aan vegetatiesystemen. Bio-fysisch gezien is dit het verschil tussen werkelijke  $r_s$  en minimale verdampingsweerstand  $r_s^{\min}$ . Dit project heeft de wekelijks gesommeerde verdampingstekorten op deze wijze voor meerdere jaren uitgerekend.

### BIOMASSAGROEI

Een plant is biologisch actief als de huidmondjes open staan om  $CO_2$  in te nemen en waterdamp uit te ademen. De voor de koolstof-assimilatie benodigde energie wordt door chlorofyl uit zonnestraling gehaald. Dit is de geabsorbeerde fotosynthetisch actieve straling (APAR). APAR wordt geschat via de spectrale Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, (ASRAR ET AL., 1984) en de totale hoeveelheid zonnestraling aan het landoppervlak. De zonnestraling of de zonneschijnduur wordt gemeten op de 32 KNMI stations en deze puntmetingen zijn verwerkt naar een grid van klimaatparameters dat over de NOAA beelden wordt gelegd.

De vertaling van geabsorbeerde straling voor fotosynthese (APAR) naar biomassa-groei wordt middels light use efficiency factoren gerealiseerd. De light use efficiency factor is in het toegepaste remote sensing model een functie van de verdampingsweerstand  $r_s$ . Een grotere opening van de huidmondjes verlaagt de weerstand  $r_s$  verhoogt de light use efficiency. Deze methode is een verdere verfijning van het voor geïrrigeerde gewassen ontwikkelde model van BASTIAANSEN EN ALI (2003).

## 3.3 VALIDATIE

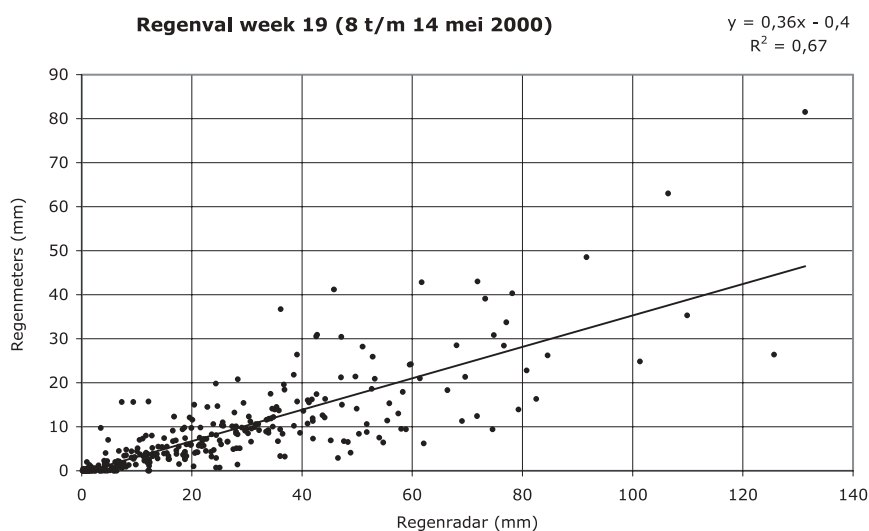
### 3.3.1 REGENVAL

Hoewel de neerslagbeelden een goede indicatie geven van de locatie en de ruimtelijke variatie van de neerslag, komt het neerslagbeeld niet overeenkomt met de werkelijke hoeveelheid neerslag gemeten op de grond. De volgende invloeden hebben een negatief effect op de nauwkeurigheid van de regenradarbeelden:

- bij de omrekening van radar reflectiviteit naar neerslagintensiteit wordt uitgegaan van een 'gemiddelde' druppelgrootte van de neerslag. Als de druppelgrootteverdeling niet 'gemiddeld' is, kunnen er afwijkingen ontstaan;
- de radar kan niet vaststellen of de geregistreerde neerslag regen, hagel of sneeuw is. De radar registreert de smeltende sneeuwvlokken als zeer grote regendruppels. De overschatting kan oplopen tot twee of drie keer de werkelijke waarde. Dit verschijnsel doet zich vooral voor in de periode november tot april;
- op grotere afstanden kijkt de radar, door de bolvorm van de aarde, over de neerslag heen en worden alleen buien gezien die tot op grote hoogte ontwikkeld zijn;

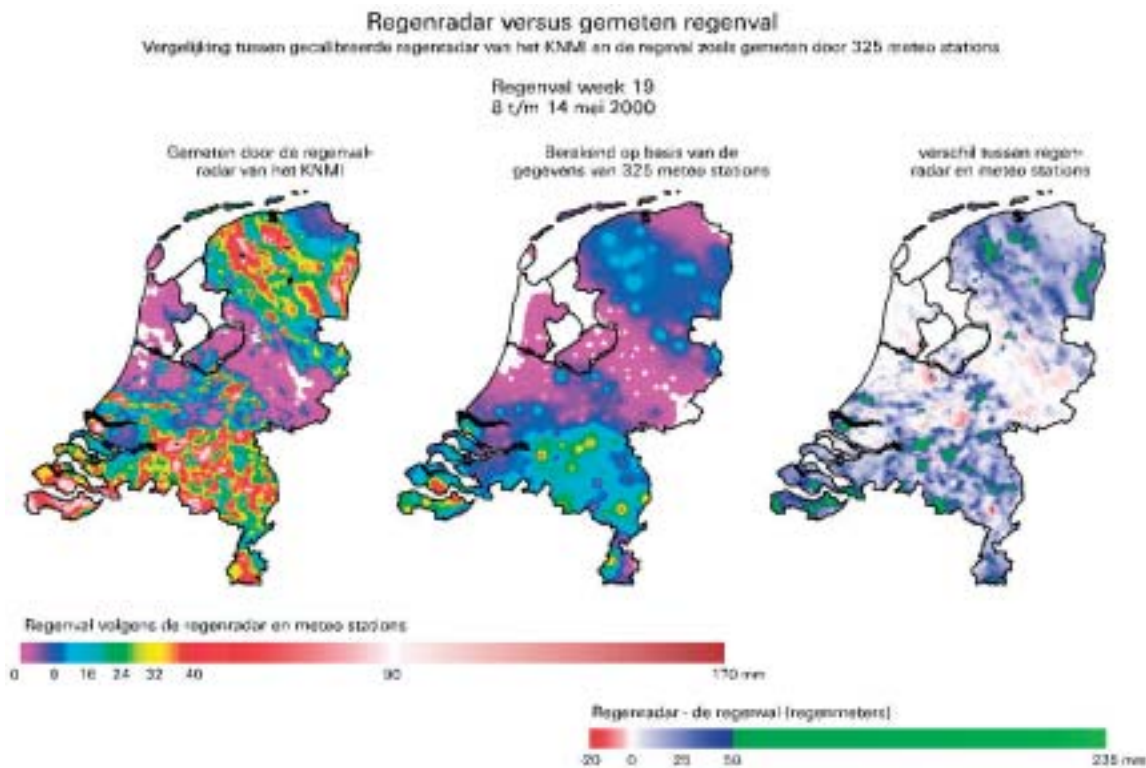
- neerslag die uit hoge wolken naar beneden valt kan onderweg verdampen als zich lager in de atmosfeer zeer droge lucht bevindt. De radar registreert dan wel neerslag, maar die bereikt de grond niet;
- andere verschijnselen dan neerslag kunnen ook reflectie opleveren.

De validatie van de regenschattingen gebaseerd op de regenradar is uitgevoerd met alle onder het beheer van het KNMI geregistreeerde regenmeters in Nederland ( $\pm 325$  stuks). Hierbij is de totale hoeveelheid neerslag in week 19 van het jaar 2000 zoals gemeten door de meteostations vergeleken met de regenradar. Dat kan door de gegevens van de meteostations te vergelijken met de radar pixels die daar het dichtste bij liggen (Figuur 3) of door het gehele radarbeeld te vergelijken met de regenval kaart die gemaakt is op basis van gegevens van de regenmeters (Figuur 4). De gemiddelde neerslag van deze week was 8,2 mm volgens de regenmeters en 24,0 mm volgens de regenradar. Dit is een aanzienlijk verschil en betekent dat er gekalibreerd moet worden.



FIGUUR 3 VERGELIJKING TUSSEN GEMETEN NEERSLAG EN ONGEKALIBREERDE GESOMMEERDE NEERSLAG VOLGENS DE REGENRADAR

Er zijn verschillende technieken beschikbaar om een kalibratie achteraf uit te voeren. De resultaten van twee methodes zijn weergegeven in Bijlage 1. Het blijkt dat voor deze specifieke week een simpele regressievergelijking tussen alle punten de hoogste correlatie geeft. Het stochastische diagram van Bijlage 1 laat zien dat de gemiddelde fout na kalibratie 2 mm/wk of minder is en dat in 90% van alle gevallen de maximale fout 12 mm/wk is.



FIGUUR 4 VERGELIJKING VAN DE REGENVAL ZOALS GEMETEN DOOR DE REGENRADAR EN DE KNMI REGENMETERS

### 3.3.2 ACTUELE VERDAMPING

Voor een vergelijking met verdampingsfluxen in het veld moeten lysimeters of meetmasten worden ingezet. Tegenwoordig hoort in dat rijtje ook de scintillometer thuis (DE BRUIN ET AL., 1996). Deze veldinstrumenten zijn allen duur en niet eenvoudig te onderhouden. Er zijn daardoor maar weinig meetgegevens over actuele verdamping in Nederland voorhanden. Voor alle duidelijkheid, de referentiegewasverdamping wordt berekend – niet gemeten – en er kan een aanzienlijk verschil tussen de actuele- en referentiegewasverdamping bestaan.

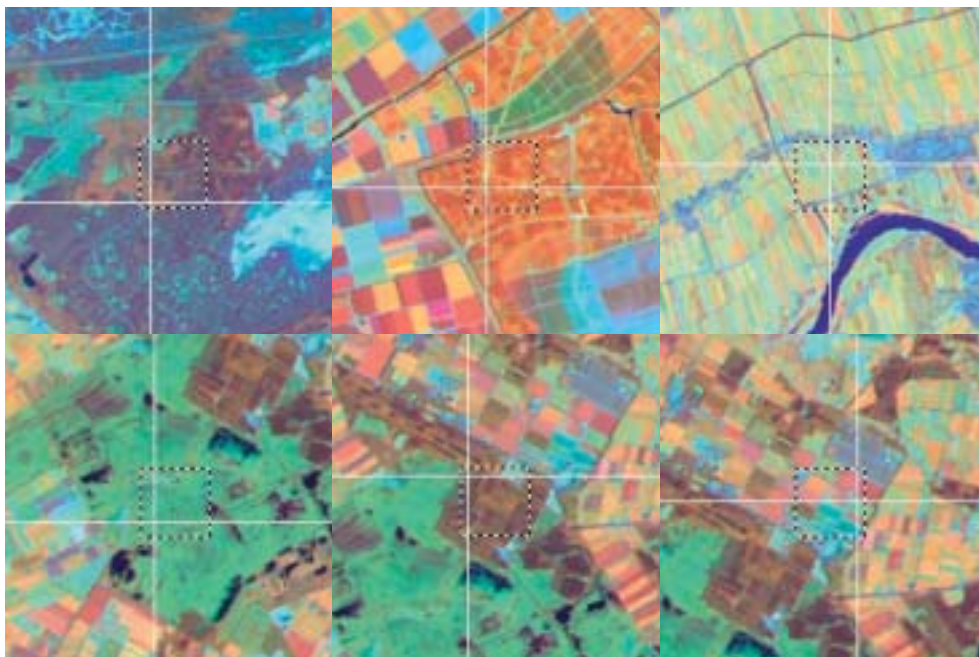
Een veel gebruikte meetmethode is de 'EDDY CORRELATIE METHODE' waarbij met een frequentie van 50 Hz het verticale transport van waterdamp gemeten wordt (ELBERS ET AL., 1996; BOSVELD 1999). Gevoelige sensoren worden daartoe hoog in een mast gemonteerd zodat een omgevingswaarde van  $H$  en  $\lambda E$  kan worden verkregen. Het nadeel van mastmetingen is dat de bijdrage uit het meetgebied op het meetsignaal niet uniform is en het niet precies bekend is waar de verdamping vandaan komt. Dit is een essentieel aspect als er met een grid van satelliet pixels moet worden vergeleken. In deze STOWA studie is voor de validatie van de SEBAL verdampingsschattingen onder Nederlandse omstandigheden gebruik gemaakt van de eddy correlatie methode en de scintillatie methode. Ook is er naar de waterbalans op regionale schaal gekeken.

Gedurende 1995 zijn in het kader van het boshydrologie project van Alterra (DOLMAN EN MOORS, 1994) en het Surface Layer Integration Measurements and Modelling (SLIMM) project in Fochteloërveen (NIEVEEN, 1999), verdampingsfluxen in Nederland intensief gemeten. De verdampingsmetingen zijn over verschillende vormen van landgebruik uitgevoerd.

De fraaie zomer van 1995 was grotendeels onbewolkt, waardoor er veel satelliet opnames zijn. Het is dus een ideaal jaar voor een validatie studie. De coördinaten van de in 1995 operationele verdampingsmeetmasten zijn weergegeven in Tabel 4. Geen van de locaties valt in een van de voor dit STOWA project geselecteerde pilot gebieden.

TABEL 4 COÖRDINATEN VAN EDDY CORRELATIE MASTEN IN 1995

| Plaats                                | Fig 5 | Landgebruik   | X-coördinaat | Y-coördinaat |
|---------------------------------------|-------|---------------|--------------|--------------|
| Kootwijk, Loobos                      | A     | Grove den     | 179.390      | 465.350      |
| Zeewolde, Fleditebos                  | B     | Populier      | 159.475      | 481.150      |
| Garderen, Speulderbos                 |       | Douglas       | 175.749      | 474.102      |
| Cabauw                                | C     | Grasland      | 123.503      | 442.665      |
| Veenhuizen, Fochteloërveen            | F     | Heesters      | 224.913      | 560.525      |
| Veenhuizen, Fochteloërveen            | D     | Pijpestrootje | 222.220      | 557.220      |
| Veenhuizen, Bankenbos, Fochteloërveen |       | Landbouw      | 224.913      | 560.525      |
| Veenhuizen, Bankenbos, Fochteloërveen | E     | Lariks        | 223.115      | 559.858      |



FIGUUR 5 DETAIL SITUATIES VAN DE LOCATIES UITGERUST MET MEETMASTEN IN 1995

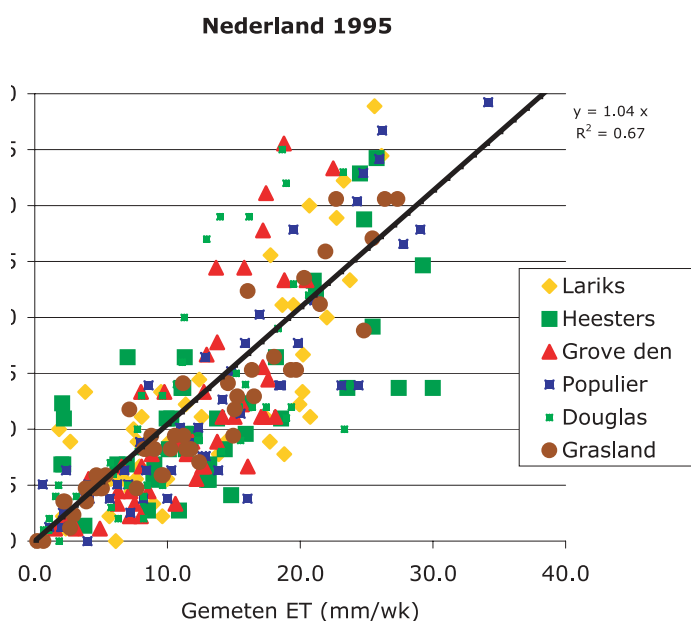
A: Kootwijk (grove den), B: Zeewolde (populier), C: Cabauw (grasland), D: Veenhuizen (pijpestrootje), E: (Bankenbos) en F: Veenhuizen (heesters). De meetmast stond op de plaats van de kruisdraden. De gearceerde vierkanten geven de km-hokken weer die voor de NOAA beelden zijn gebruikt. De achtergrond is afkomstig van een Landsat-5 opname uit 1995 (rood=band 4, groen=band 5, blauw=band 3)

De nauwkeurigheid van de SEBAL resultaten kunnen op verschillende tijdschalen worden bestudeerd. De eerste tijdschaal zijn de dagen dat er een NOAA opname beschikbaar was. Het KNMI heeft SEBAL gevalideerd voor de condities in de omgeving van de meetmast in Cabauw en in het Speulderbos nabij Garderen (Sintonen, 2001). De conclusie voor de graslandgebieden van Cabauw is dat op NOAA dagen de actuele verdamping gemiddeld geno-

men met 21% door SEBAL wordt overschat (zie Bijlage 2). Op individuele NOAA dagen is deze afwijking voor het Speulderbos gemiddeld met een overschatting van 78%, onacceptabel hoog.

De integratie van SEBAL met de Penman-Monteith vergelijking levert weektotaal van de actuele verdamping op. Voor weken dat er een geslaagde NOAA opname is, daalt de gemiddelde fout over een langere periode met verschillende weken voor Cabauw tot 0% en voor het Speulderbos tot 46%. Blijkbaar is er dus een random fout in het model dat bij een tijdsintegratie wordt gereduceerd. Om deze hypothese verder te testen is er een vergelijking voor alle weken van het jaar 1995 gemaakt, dus ook voor weken van het jaar dat er helemaal geen NOAA beeld beschikbaar was. Figuur 6 geeft aan dat SEBAL gemiddeld voor alle weken en locaties tezamen zonder enige kalibratie een afwijking van 4% heeft ( $R^2=0.67$ ). Deze afname van de random fout in SEBAL verdampingsfluxen is ook voor geïrrigeerde gewassen in Idaho (ALLEN ET AL., 2002), Sri Lanka (HEMAKUMARA ET AL., 2003) en Turkije (MEIJNINGER, 2003) geconstateerd en is dus geen toevaligheid.

FIGUUR 6 OVEREENKOMST TUSSEN GEMETEN EN GESCHATTE ACTUELE VERDAMPING MET DE SEBAL REMOTE SENSING TECHNIEK IN NEDERLAND

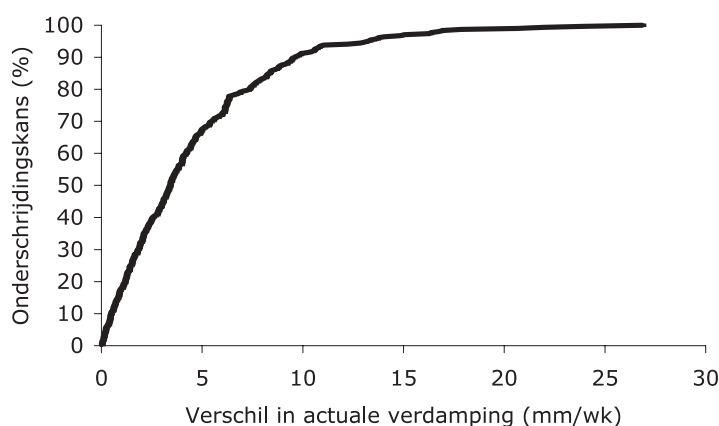


De vertaling van de weekresultaten van Figuur 6 naar de kansdichtheid dat een bepaalde afwijking voorkomt is uiteengezet in Figuur 7. Alle 51 weken en 6 verschillende meetlocaties zijn in de beschouwing meegenomen. Het blijkt dat voor een gemiddeld geval met 50% kans de afwijking 4 mm/week is of kleiner. In 90% van alle gevallen ligt de afwijking op maximaal 10 mm/week. Deze getallen zijn erop gebaseerd dat de veldmetingen zuiver zijn. Het dient echter te worden opgemerkt dat ook eddy correlatie metingen een foutenmarge van 15 tot 20% kunnen hebben (R.G. ALLEN 2001, **personal communication**; J.D. KALMA 2003, **personal communication**). Daarmee komen de meeste afwijkingen in de foutenmarge te liggen en hoeven de afwijkingen niet echt fout te zijn. Daar komt verder het aspect van de discrepantie tussen meet-en pixelschaal, zoals in Figuur 5 is afgebeeld, bovenop. De afwijking tussen



meet- en pixelschaal ontstaat doordat de meetinstrumenten in de mast een voelbare (H) en latent warmte flux ( $E$ ) flux meten, die afkomstig is uit een gebied bovenwinds van de meetmast. De H en  $E$  flux van dichtbij de mast dragen meer bij dan de verder af gelegen locaties. De NOAA pixel waardes geven de totale waarde van een gebied van 100 ha daar waar de pixel gesitueerd is. De veldinstrumenten 'kijken' dus naar een andere oppervlak. Praktisch gezien betekent dit dat de pixel waardes moeilijk exact te valideren zijn.

FIGUUR 7 ONDERSCHRIJDINGSKANS VAN DE AFWIJKING TUSSEN GEMETEN EN GESCHATTE WAARDES VAN DE GESOMMEERDE WEEKVERDAMPING. ER ZIJN 6 MEETMASTEN GEBRUIKT VOOR 51 COMPLETE WEKEN IN 1995



Bij het KNMI en de Vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit wordt momenteel onderzocht of verdamping vanuit remote sensing niet op een andere manier kan worden gevalideerd. Een voorlopig resultaat van een scintillometer meting tussen de zendmast in Lopik en de KNMI mast in Cabauw over een afstand van 10 km is bemoedigend (2% afwijking). Bijlage 3 laat zien dat de gebiedsgemiddelde voelbare warmte flux van 10 NOAA pixels ( $88 \text{ W/m}^2$ ) goed met de scintillometer meting overeen komt ( $90 \text{ W/m}^2$ ) terwijl er geen kalibratie heeft plaats gevonden (KOHSEK ET AL., 2002). Dit is een zuivere manier van valideren zonder dat het schaalprobleem een versturende factor is. MEIJNINGER ET AL. (2002) melden de eerste resultaten van het rechtstreeks meten van de latente warme flux met een radiogolf scintillometer over een heterogeen akkerbouwgebied in Zuidelijk Flevoland. Dit is een mogelijkheid SEBAL in Nederland op een uitgebreidere schaal verder te gaan valideren.

Om op een nog grotere schaal de actuele verdamping van SEBAL te toetsen, is een vergelijking met de regionale waterbalans noodzakelijk. Voor de stroomgebieden van de Drentse AA (SCHUURMANS ET AL., 2003) en voor de Beerse en Reusel (VAN DER BOLT ET AL., 1996) is met behulp van het hydrologische model SIMGRO de regionale waterbalans opgesteld. Dit kan niet als een strikte validatie worden beschouwd omdat een voorspellingsmodel niet op metingen is gebaseerd. Maar dergelijke modellen worden gekalibreerd op afvoeren en grondwaterstanden en moeten dus toch een grote dosis van waarheid hebben. De resultaten van de Drentse AA zijn gepresenteerd in Bijlage 4; het verschil voor het totale gebied van  $300 \text{ km}^2$  voor een periode van 12 weken is 7%. Voor het stroomgebied van de Beerse en Reusel ( $570 \text{ km}^2$ ) is het verschil in gebiedsverdamping tussen SIMGRO en SEBAL slechts 2% (BASTIAANSEN ET AL., 2001).

## KADER 3

**NAUWKEURIGHEID ACTUELE VERDAMPING**

De nauwkeurigheid van SEBAL onder Nederlandse omstandigheden varieert met de gebiedsgrootte en het tijdsinterval waarover de verdampingsfluxen worden geïntegreerd. De fout is voor grote gebieden (300 km<sup>2</sup>) vrij klein: 2 tot 7 %. Voor tijdsintervallen daalt de fout van 20% op weekbasis tot 4 % op jaarbasis. Voor wekelijkse verdamping voor èèn NOAA pixel is een foutendiagram op weekbasis opgesteld. De gemiddelde afwijking is 2 mm/wk en in 90 % van alle gevallen is de fout kleiner dan 10 mm/wk.

**3.3.3 WEERSVOORSPELLING**

In het kader van dit project is een regionale weersvoorspelling voor Oost-Gelderland opgesteld. In de verwachtingen is rekening gehouden met de wensen van de waterbeheerder om meer precies te weten hoeveel regen er gaat vallen en niet alleen of het nat of droog blijft. De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

- 1 In de gevallen dat het droog is gebleven, hoe vaak is dat juist verwacht?
- 2 In hoeverre is de gevallen neerslaghoeveelheid juist verwacht?
- 3 In de gevallen dat er meer dan 5 mm regen is gevallen, hoe vaak is dat juist verwacht?
- 4 In de gevallen dat er meer dan 10 mm regen is gevallen, hoe vaak is dat juist verwacht?

Deze vragen zijn onderzocht voor de neerslagverwachtingen gegenereerd met het HIRLAM simulatiemodel voor 2, 5 en 8 dagen vooruit. In tabel 5 zijn de gebruikte criteria en marges weergegeven.

| Onderzoeksvraag   | Gevallen neerslag (waarnemingen)   | Criterium,<br>inclusief marge geregistreeerde neerslag  |
|---|--|---|
| 1 Is 'droog' weer ook juist verwacht?   | Het is 'droog' als er gemiddeld in het gebied 1 mm of minder neerslag is gevallen ( $\leq$ of gelijk aan 1 mm) | $\leq 1$ mm   |
| 2 Op de dagen dat er regen gevallen is, was dan de hoeveelheid juist verwacht?    | De onderzoeksvraag wordt getoetst voor alle dagen dat er 1 mm of meer regen is gevallen ( $\geq 1$ mm)         | Als regen gelijk aan $\geq 1$ mm: hoeveelheid juist binnen een marge van + of - 50 % van de geregistreeerde hoeveelheid |
| 3 In de gevallen dat er meer dan 5 mm regen is gevallen, was dat juist verwacht?  | > 5 mm   | > 2,5 mm  |
| 4 In de gevallen dat er meer dan 10 mm regen is gevallen, was dat juist verwacht? | > 10 mm  | > 5 mm  |

TABEL 5 METHODE VAN AANPAK OM DE NAUWKEURIGHEID VAN WEERSVOORSPELLING TE EVALUEREN

Om de gegevens van de totale verwachtingsperiode te onderzoeken zijn de verwachtingen van de periode 17 mei tot en met 30 oktober 2000 beoordeeld. De dagen dat er geen synops waarnemingen beschikbaar waren zijn niet meegeteld in de analyse. Dit is beperkt gebleven tot 9 dagen. Er is gerekend met 152 waarnemingsdagen. Er is sprake van een lichte verschuiving in de data die worden gebruikt voor de vergelijking met de werkelijke neerslag omdat we analyseren wat de uitkomst is van de verwachting van 2 dagen vooruit, 5 dagen vooruit en 8 dagen vooruit. Om de totale dataset te kunnen gebruiken, gelden voor de analyse de volgende periodes:

- verwachting 2 dagen vooruit: periode 17 mei tot en met 24 oktober
- verwachting 5 dagen vooruit: periode 20 mei tot en met 27 oktober
- verwachting 8 dagen vooruit: periode 23 mei tot en met 30 oktober

De resultaten van de analyse worden weergegeven in zogenoemde kruistabellen. Bij het analyseren van de gegevens zijn er 4 uitkomsten mogelijk. Alle kruistabellen voor de geteste hypothesen zijn opgenomen in Bijlage 5. De samenvatting is gepresenteerd in Tabel 6.

TABEL 6 NAUWKEURIGHEID WEERSVOORSPELLING

| % goed in x dagen vooruit >  | 2 d | 5 d | 8 d |
|--|-----|-----|-----|
| Is droog weer goed verwacht ?  | 70  | 61  | 55  |
| Op de dagen dat er regen gevallen is, was dan de hoeveelheid juist verwacht ?    | 64  | 61  | 60  |
| In de gevallen dat er meer dan 5 mm gevallen is, was dat juist verwacht ?        | 81  | 80  | 82  |
| In de gevallen dat er meer dan 10 mm regen is gevallen, was dat juist verwacht ? | 91  | 93  | 93  |

Uit Tabel 6 kan worden geconcludeerd dat het voorspellen van nat weer meer succesvol is dan het voorspellen van droog weer. Het voorspellen van dagen met 5 of 10 mm regenval is vrij nauwkeurig mogelijk, zelfs voor 5 tot 8 dagen vooruit. Dit is een essentiële bevinding voor beregeningsaspecten en voor het stuwbeheer. Het blijkt moeilijk te zijn om kleine regenhoeveelheden te voorspellen, hoewel droog weer beter wordt voorspeld dan regen. De score van de neerslagverwachting neemt af naarmate de verwachtingstermijn toeneemt, hetgeen niet verwonderlijk is.

## 4

# REMOTE SENSING TOEPASSINGEN IN HET WATERBEHEER

Dit hoofdstuk behandelt de onderzoeksvragen in dezelfde volgorde als geformuleerd in hoofdstuk 2.2 gebaseerd op de conclusies van de deelrapporten. Op het einde van dit hoofdstuk wordt in Tabel 8 een bondige samenvatting gegeven.

## ONDERZOEKSVRAAG 1

**Bieden remote sensing metingen de mogelijkheid vlakdekkende informatie van regenval, actuele verdamping en bodemvocht voor verschillende vormen van landgebruik te kwantificeren?**

### NAUWKEURIGHEID

Om deze onderzoeksvraag goed te kunnen beoordelen moet eerst worden vastgesteld wat de foutenmarge van de veld meetmethodes is. Voor eddy correlatie systemen wordt een getal van 15 tot 20% genoemd. Bij een gemiddelde zomerverdamping van 30 mm/week is dat dus een onzekerheid van 5 tot 6 mm/week. De geconstateerde afwijking bij 90% van de remote sensing schattingen is 10 mm/week of minder en de gemiddelde afwijking in 90% van alle gevallen is 4.5 mm/week. Dit is minder dan de toelaatbare marge van 5 tot 6 mm en actuele verdamping kan daarom worden aangemerkt als zijnde voldoende nauwkeurig (zeker met de kennis dat voor grotere oppervlaktes en langere tijdsommaties de nauwkeurigheid stijgt). De validatie is uitgevoerd voor verschillende vormen van landgebruik (heesters, gras, lariks, grove den, populier, douglas).

De mogelijkheden voor het bepalen van de gebied gemiddelde neerslag m.b.v. radarwaarnemingen zijn nog volop in ontwikkeling. Voor de bepaling van de absolute hoeveelheid is een ijking met regenmeters noodzakelijk. Anders is de gesommeerde regenval afgeleid uit de regenradar niet nauwkeurig.

Een probleem is het meten van de regenval m.b.v. regenmeters aan de grond voor een oppervlakte van 625 ha (de regenradar pixels zijn 2.5 km x 2.5 km). De ruimtelijke variatie is groot. Zo hebben HAKVOORT ET AL. (1993) in West-Brabant geconstateerd dat de ruimtelijke range tussen regenmeters (n=7 tot 13) op een tijdbasis van enkele uren 9.5 mm is, terwijl de gemiddelde waarde 12.5 mm is (dit is een geschatte fout van  $4.5/12.5 \times 100\% = 36\%$ ). Dit betekent dat het in de praktijk heel moeilijk is de gemiddelde regenval van een 2,5 km radar pixel te schatten m.b.v. 1 of 2 regenmeters. De traditionele veld meetmethode heeft dus een aanzienlijke fout.

\* De validaties in het buitenland geven een gemiddelde fout van  $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  bij een onderschrijdingskans van 50% op dagbasis weer. In 90% van alle gevallen is de fout  $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  of minder (SCOTT ET AL., 2003)

De geconstateerde afwijking bij 90% van de regenradar metingen na kalibratie is 12 mm/week of minder (zie Bijlage 1) en de gemiddelde fout is 6 mm/week. Bij een gemiddelde zomerneerslag van 55 mm/week is dat een fout van 11%. De fout van de veld meetmethode is zeker groter dan 11% en daarom wordt geconcludeerd dat de nauwkeurigheid van de regenradar na kalibratie voldoende is.

Over de nauwkeurigheid van de remote sensing bodemvochtschattingen kan slechts worden vermeld dat in de toekomst een speciaal veldexperiment dient te worden ontworpen. Tot op heden is de nauwkeurigheid in Nederland niet getest. Voor de pilot studie in de Groningse veenkolonien blijkt er een grote discrepantie tussen het bodemvocht berekend met de SWW en SEBAL modellen te bestaan, waardoor het vermoeden bestaat dat het bodemvocht onnauwkeurig is. Door het toepassen van data-assimilatie technieken kan het verschil tussen deze modellen worden verkleind, maar dat betekent nog niet dat de hydrologische processen goed beschreven zijn. Het genormaliseerde bodemvochtgehalte is het relatieve vochtgehalte van een pixel  $\theta/\theta_{\text{sat}}(x,y)$  t.o.v. de regionaal gemiddelde waarde in hetzelfde landschap  $\langle \theta/\theta_{\text{sat}} \rangle$ . Omdat bij een over/onderschatting van het wekelijkse vochtgehalte hetzelfde gedrag voor een pixel en de regiowaarde wordt verwacht, kan de verhouding van  $\theta/\theta_{\text{sat}}(x,y) / \langle \theta/\theta_{\text{sat}} \rangle$  goed zijn.

#### KOSTENEFFECTIVITEIT

De prijs voor het conventioneel in het veld meten is sterk afhankelijk van het soort informatie dat verzameld wordt. Voor het meten van grondwaterstanden voor een gebied van 100,000 ha met een grid van 50 km zijn  $6 \times 6 = 36$  peilbuizen nodig à € 1200. Een dergelijke investering van € 50,000 (complete uitrusting) kan over ongeveer 5 jaren worden afgeschreven en kost dan € 10,000 per jaar. Voor het meten van bodemvocht met automatische sensoren geldt ongeveer een gelijk bedrag. Het meten van gebiedsverdamping met een netwerk van bijvoorbeeld 4 scintillometers kost € 120,000. Voor het beschrijven van de ruimtelijke variatie van groeiplaatsfactoren (grondwaterstand, bodemvocht en verdamping) is al snel een kostenplaatje van € 50,000/jaar van toepassing.

Voor de aanschaf van standaard wekelijkse NOAA producten zijn de kosten voor een gebied van 100,000 ha, inclusief het uitvoeren van berekeningen, ongeveer € 15,000 per jaar (zie bijlage 6). Dit project heeft aangetoond dat er ongeveer 25 goede beelden per jaar kunnen worden opgenomen. Vanwege de verschillen in schaal zijn de technieken niet volledig vergelijkbaar en het is niet zo dat de ene techniek de andere kan vervangen. Het is een aanvulling op elkaar. Strikt genomen kan dus het in sectie 2.2 gestelde criterium niet goed worden geëvalueerd. Wel kan worden gesteld dat de remote sensing kosten maar een fractie zijn van de totale meetkosten voor groeiplaatsfactoren (grondwaterstand, bodemvocht, verdamping, debieten etc.) en daarmee geen doorslaggevende rol van betekenis zijn voor het gebruik van de techniek.

## ONDERZOEKSVRAAG 2

**Kunnen remote sensing beelden de hydrologische gewasgroei condities beter in kaart brengen dan conventioneel vergaarde metingen van open waterpeil en grondwaterstand ?**

Traditioneel wordt ervan uitgegaan dat grondwaterstanden en drooglegging samen met het bodemtype de gewasgroei conditie bepalen (b.v. de standaard HELP tabellen etc.). Omdat de relaties tussen drooglegging en verdamping niet uniek zijn, moeten conventionele methodes a priori kritisch bekeken worden. Datzelfde geldt ook voor de absolute nauwkeurigheid van de remote sensing methoden. Uit een op Landsat metingen gebaseerde biomassagroei kaart van een veenweidegebied blijkt dat bedrijfsvoering een grotere invloed op de grasgroei en verdamping heeft dan de drooglegging. Een satelliet meet het netto resultaat van beheer in de breedste zin van het woord, inclusief antropogene invloeden. Een additioneel voordeel is dat de informatie vlakdekkend is, waardoor er een completer beeld ontstaat.

Een vergelijking tussen drooglegging enerzijds en verdamping en grasgroei anderzijds is gemaakt voor verschillende bodemtypes in de polder Wollegaast, maar er komt geen statistisch significante relatie naar voren. Wel blijkt dat de grasgroei in de herfst op minerale gronden hoger is dan in klei-op-veen gronden. Omdat er in Wollegaast geen grondwaterstand informatie aanwezig is – althans niet voldoende voor een analyse – is niet onderzocht of remote sensing informatie over de grasgroei beter is dan informatie over de grondwaterstand. Daar is aanvullend academisch onderzoek voor nodig. Echter, een test naar de relatie tussen grondwaterstand en actuele verdamping op dagbasis bij een aantal peilvakken gesimuleerd door het SWW model gaf in de Veenkolonieën aan dat er ook geen direct verband is. De bodem werkt als een spons-mechanisme en bodemvochtstroming is sterk niet-stationair waardoor effecten van grondwaterstand zich niet meteen doorvertalen<sup>3</sup>. Het is niet uit te sluiten dat voor langere periodes er wel een verband bestaat.

## ONDERZOEKSVRAAG 3

**Ontstaat door het gebruik van remote sensing informatie een ander hydrologisch inzicht en zijn er consequenties voor het opstellen van toekomstige inrichting- en beheersstrategieën ?**

De studie bij Boarn en Klif toont aan dat er geen verband is tussen drooglegging en grasproductie. Dit is tegenstrijdig met traditionele opvattingen in de agro-hydrologie. De verklaring zit in het feit dat de drainageweerstand in Wollegaast hoog zijn (greppelsysteem is 25.000 dagen; KROES ET AL., 2001). Grondwater gestuurd peilbeheer is dus niet gemakkelijk uitvoerbaar in deze polder. Dit is wezenlijke informatie voor het opstellen van beheersstrategieën omdat factoren zoals berijdbaarheid van meer doorslaggevende betekenis zijn dan grasproductie.

Het Hoogheemraadschap van West-Brabant wil de aanvoer en afvoer van water tussen de boezem en de omringende polders baseren op de waterbalans, maar het is niet gelukt de waterbalans uniek op te lossen. Het wekelijks beschikbaar zijn van het verdampingstekort biedt perspectieven bij het monitoren van de verdroging van de agrarische hoofdstructuur

<sup>3</sup> De betrouwbaarheid van biomassagroei uit SEBAL is in een aardappel productie project buiten de STOWA studie op de proef gesteld. De ruimtelijke verschillen uit de remote sensing voor 10 velden verspreid over heel Nederland komen overeen met proefrooiingen in het veld.

en natuurgebieden op een korte tijdschaal. Actuele verdamping is bij de waterbalans van het Hoogheemraadschap met kwel en wegzijging in èèn totale term samengevat en dit levert strikt genomen een ander soort waterbalans. Het verdampingstekort is groter dan gedacht en er moet landbouwkundig gezien in droge jaren eerder worden ingegrepen, vooral omdat ondergrondse infiltratie vanuit sloten een langzaam proces is.

De studie bij Hoogheemraadschap van West-Brabant heeft aangetoond dat de wateraanvoer vanuit de het Mark-Vliet boezem systeem in juli en augustus 1995 te laat was en dat men in juni reeds met water inlaten had moeten beginnen. Echter, het water moest soms verplicht naar het Volkerak moet worden gestuurd om blauwalgengroei te voorkomen.

Het blijkt dat het bodemvochtgehalte in gebieden waar geen grondwaterafhankelijk peilbeheer kan worden gevoerd, zoals in het Groninger zeekleigebied, toch optimaal kan zijn. Hieruit kan worden opgemaakt dat grondwater gerelateerd peilbeheer in kleigebieden niet nodig is.

Het temporele verloop van het bodemvocht in de Groningse veenkoloniën wordt gebruikt om de periode van landbewerking te kiezen en van winter naar zomerpeilen over te stappen. De afname van biomassagroei aan het einde van het groeiseizoen is een nieuw hulpmiddel om te besluiten weer van het hoge zomerpeil naar het lage winterpeil te gaan.

Verder is het interessant te vermelden dat de GGOR realisatie is getest voor een klein gebied in Groningen waarbij gebruik is gemaakt van een complexe rekenmethode (grondwater model en landgebruikskaart) en een verdampingstekort met Landsat beelden. In grote lijnen komen de resultaten tussen de doelrealisatie en de verdampingstekorten overeen, maar op een detail niveau zijn ook heel wat verschillen detecteerbaar. Dit kan gevolgen hebben voor de inrichting van dat bewuste gebied.

De studie bij Waterschap Rijn en IJssel toont aan dat het bodemvochtgehalte in de bovengrond in 6 van de 7 anti-verdrogingsgebieden niet systematisch hoger wordt dan hun nabijge omgeving met dezelfde landschapskenmerken. Twee van de 7 gebieden worden zelfs droger en de aard van de waterconservering ingrepen zouden kunnen worden geëvalueerd. Er wordt bijvoorbeeld extra oppervlaktewater aangevoerd naar het grondwater-onttrekingsgebied 't Klooster, maar het heeft er de schijn van dat deze aanvulling teniet wordt gedaan door de ondergrondse onttrekkingen.

De bodemvocht-herstelkaart geeft aan dat er gebieden zijn die over een periode van 5 jaar natter en andere droger worden. Deze constatering komt niet met de beleving van het Waterschap overeen. Dit is een discrepantie die niet is opgelost en waar alleen met veldmetingen en interviews meer zinnigs over kan worden gezegd. Als additionele metingen bevestigen dat de bovengrond droger wordt, dan moet de aard van de vernattingsingreep wijzingen.

Bij het onderdeel beregenen bleek dat de vormen van de peilvakken in Zuidelijk Flevoland op een kaart met verdampingstekorten zichtbaar zijn. Hier blijkt dus wel een verband tussen drooglegging en gewasverdamping te bestaan (de drainage weerstand is inderdaad laag) en een vergelijking met drooglegging zou kunnen worden uitgevoerd.

## ONDERZOEKSVRAAG 4

**Kan remote sensing operationeel worden ingezet om wekelijkse waterbeheer besluiten te ondersteunen**

Geschikte NOAA satellietbeelden zijn na bewerking bij WaterWatch doorgestuurd naar de waterschappen Hunze en AA's en Rijn en IJssel. Vanwege handmatige handelingen op het KNMI duurde dit gemiddeld genomen 3 dagen. Dit kan technisch gezien worden verkort, maar dan zijn er meer kosten aan verbonden om het proces te automatiseren. Het Waterschap Hunze en Aa's had duidelijke ideeën over het gebruik van de data omdat ze gewend waren om naar verdamping en verdampingstekorten voor het operationele waterbeheer te kijken. Op momenten dat aanzienlijke verdampingstekorten worden geconstateerd door remote sensing beelden, wordt door het SWW model het advies gegeven om de peilen naar boven toe bij te stellen, of worden de peilen door de beheerder al kunstmatig verhoogd. Omdat de overeenkomst en timing goed is, kan remote sensing voor het wekelijkse beheer verder worden getoetst, mits er operationele objectieve beslisregels worden samengesteld die een advies geven ten aanzien van het peilbeheer. Het aantal geleverde beelden komt met het aantal noodzakelijke beelden overeen.

Na afronding van de STOWA studie zijn 3 andere waterschappen gaan experimenteren met de wekelijkse remote sensing data ter ondersteuning van het waterbeheer. De verdampingscijfers zijn beschikbaar en elk waterschap kijkt hoe de verdampingsreeks het beste kan worden benut.

## ONDERZOEKSVRAAG 5

**Wat is de toegevoegde waarde van ruimtelijke gedistribueerde weersverwachtings-informatie ?**

Dit product is eenvoudig en kan worden ingezet in de praktijk van het waterbeheer. In 90% van alle gevallen wordt droog weer 2 dagen goed vooruit voorspeld. Voor natte dagen (>5 mm/d), is de score 81% goed. Het blijkt dat regenachtig weer goed kan worden voorspeld, zodat boeren weten of het zinvol is te gaan beregenen. Voor waterschappen betekent dit dat men in stuwbeheer en peilen voor grondwater gerelateerd peilbeheer beter kan inspelen.

In het groeiseizoen van 2000 heeft weersinformatie een cruciale rol voor Waterschap Rijn en IJssel gehad om een beregeningsverbod niet af te kondigen omdat regen werd verwacht.

## ONDERZOEKSVRAAG 6

**Wat is de vereiste ruimte- en tijdsresolutie van vlakdekkende informatie voor de diverse toepassingen in het waterbeheer ?**

Het antwoord op vraag 6 kan het beste schematisch worden beantwoord zoals weergegeven in Tabel 7.



**TABEL 7** GEADVISEERDE TIJD- EN RUIMTE RESOLUTIES VOOR REMOTE SENSING STUDIES.

| Thema  | Ruimte | Gewenst vanuit waterbeheer                                | Technisch haalbaar      |
|--|--------|---|-------------------------|
| Landbouwkundige productie, detail                    | 30 m   | 1 maal per week   | 3 maal per zomerseizoen |
| Landbouwkundige productie, grof                      | 1100 m | 2 maal per maand  | 1 maal per week         |
| Aanvoer gebiedsvreemd water                          | 1100 m | 1 maal per dag  | 1 maal per dag          |
| Evaluatie gewenst grondwater regime (doelrealisatie) | 30 m   | 2 maal per maand  | 3 maal per zomerseizoen |
| Evaluatie gewenst peilbeheer                         | 30 m   | 2 maal per maand  | 3 maal per zomerseizoen |
| Anti-verdrogingsbestrijding                          | 1100 m | 2 maal per maand  | 1 maal per week         |
| Natschade  | 30 m   | 1 maal per week   | 3 maal per zomerseizoen |
| Opzetten/afbouwen van zomer en winterpeil            | 1100 m | 1 maal per dag in het vroege voorjaar en in de late zomer | 1 maal per dag          |
| Beregeningsadvies / beregeningsverbod                | 1100 m | 2 maal per week   | 1 maal per dag          |

De resoluties zijn gebaseerd op Landsat (30 m) en NOAA satellietgegevens (1100 m). ASTER beelden zijn een alternatief voor Landsat beelden en MODIS beelden een mogelijk alternatief voor NOAA beelden

Tabel 8 bevat een samenvatting van de antwoorden van de verschillende onderzoeksvragen.

**TABEL 8** OVERZICHT ANTWOORDEN OP DE ONDERZOEKSVRAGEN**VRAAG 1** KAN VLAKDEKKENDE GROEIPLAATS INFORMATIE OPERATIONEEL WORDEN VERKREGEN ?

ANTWOORD 1 De regenradar beelden moeten eerst worden gekalibreerd m.b.v. regenmeters. De verdampingsbeelden zijn nauwkeurig genoeg, vooral voor grotere gebieden en langere tijdschaal. Voor het valideren van bodemvocht moet een speciale veldcampagne worden opgezet. De kosten voor remote sensing zijn maar een fractie van de kosten voor een hydrologisch netwerk. Omdat de meetschalen niet gelijk zijn, kan remote sensing geen vervanger van puntmetingen zijn. Het is een aanvulling op traditionele veldmetingen.

**VRAAG 2** IS GEWASGROEI UIT REMOTE SENSING EEN ALTERNATIEF VOOR BESTAANDE TECHNIEKEN ?

ANTWOORD 2 Remote sensing schatting van de biomassa-productie hebben een goede fysische basis en nemen het geïntegreerde resultaat van alle aspecten van het waterbeheer en agrarische bedrijfsvoering waar. Dit is een alternatief voor het gebruik van open waterpeilen en grondwaterstanden in combinatie met standaard tabellen van droogte- en natschade. Omdat remote sensing ook voor bos- en natuurterreinen toepasbaar is, zouden relaties met grondwaterstanden verder kunnen worden onderzocht. Omdat de informatie vlakdekkend is, wordt een completer beeld gekregen van de variatie in terreineigenschappen en de processen aan het aardoppervlak.

**VRAAG 3** ONTSTAAT ER DOOR REMOTE SENSING EEN ANDER HYDROLOGISCH INZICHT ?

ANTWOORD 3 In de polder Wollegaast is gebleken dat drooglegging (dus peilbeheer) niet essentieel is voor graslandproductie. Dit lijkt vooral aan drainageweerstanden te zijn gekoppeld. In het Mark-Vliet boezemstelsel blijkt dat men te laat met het inlaten van gebiedsvreemd water begint. In droge zomers moet meer water in de West-Brabantse kleipolders worden ingelaten. Voor de anti-verdrogingsgebieden in Oost Gelderland kan niet worden geconstateerd (op een gebied na) dat de bovengrond natter wordt. Dat betekent niet dat de projecten niet geslaagd zijn omdat de criteria daarvoor niet door remote sensing kunnen worden vastgesteld. Het openwaterbeheer in Zuidelijk Flevoland lijkt een relatie met de droogteschade van landbouwgewassen te hebben. Bij verder onderzoek zouden de oorzaken beter kunnen worden vastgesteld. Remote sensing in Groningen laat zien dat de doelrealisatie van GGOR met Landsat beelden kan worden ondersteund. Hiermee kan dus de afwijking ten opzichte van de GGOR worden vastgesteld.

**VRAAG 4 IS REMOTE SENSING GESCHIKT VOOR WEKELIJKSE WATERBEHEER BESLUITEN ?**

ANTWOORD 4 Satellietbeelden van het wekelijkse verdampingstekort (ETpot-ETact) van de veenkoloniën komen overeen met wijzigen van het oppervlaktewater peil. In het vroege voorjaar zijn de beelden van bodemvocht bruikbaar om van winter- naar zomerpeil te gaan. In het einde van de zomer kunnen beelden van biomassa productie worden gebruikt om weer terug van zomer- naar winterpeil te gaan. Het gebruik van het verdampingsoverschot wordt in West-Brabant als een alternatief voor het oplossen van de waterbalans beschouwd.

**VRAAG 5 IS RUIMTELIJKE GEDISTRIBUEERDE WEERSVOORSPELLING NUTTIG ?**

ANTWOORD 5 Door het opstellen van een regionale weersverwachting kunnen peilbeheerders, boeren en waterschapshydrologen een beter besluit nemen over beregenen, beregeningsverboden en instellen van stuwen.

**VRAAG 6 ZIJN ER VOLDOENDE SATELLIETBEELDEN BESCHIKBAAR VOOR IMPLEMENTATIE ?**

ANTWOORD 6 Er zijn niet genoeg beelden voor een ideaal beheer voorhanden voor (i) gedetailleerde landbouwkundige productie, (ii) evalueren doelrealisatie, (iii) evaluatie gewenst peilbeheer en (iv) monitoren natschade. Voor een grove landbouwkundige productie, het aanvoeren van gebiedsvreemd water, anti-verdrogingsbestrijding, peilbeheer en beregeningsadvies zijn genoeg satelliet beelden operationeel aanwezig.



# 5

## AANBEVELINGEN VOOR IMPLEMENTATIE EN OPLOSSEN KNELPUNTEN

### 5.1 AANBEVELINGEN

#### PRAKTISCH WATERBEHEER

Verdamping, verdampingstekorten en biomassagroei uit remote sensing zijn voldoende nauwkeurig en kosteneffectief. Toch bestaat er ‘drempelvrees’ om met remote sensing gegevens in het waterbeheer te gaan beginnen. Waterbeheerders twijfelen veelal aan de betrouwbaarheid van de data omdat men niet weet hoe de gegevens tot stand komen. De belangrijkste aanbeveling van deze studie is om de eindgebruiker meer ervaring met de techniek te laten opbouwen zodat hij/zij ermee vertrouwd raakt<sup>5</sup>. Remote sensing raster informatie over groeiplaatsfactoren moet naar beslissingen worden geconverteerd en daar is nog een heel traject te gaan. Nieuwe studies dienen daarom te worden geïnitieerd voor gebieden waar bestanden van grondwaterstand, oppervlaktewaterstand, drainageweestand, aanvoer, afvoer, regenval, landgebruik (LGN/pyreireis), bodemkaart en hoogtekaart (AHN) reeds aanwezig zijn. Dat maakt de interpretatie van remote sensing technologie gemakkelijker.

Deze verkennende STOWA studie heeft aangegeven dat er potentiële mogelijkheden zijn en dat het de moeite waard is remote sensing applicaties te gaan ontwikkelen. Maar voor elk waterschap zal de vraagstelling en de toepassing anders zijn en dit kan slechts met eigen inzet worden gerealiseerd. De remote sensing consultant moet van een ‘initiatief-rol naar een ‘assistentie’-rol overstappen.

In de meeste pilot studies blijkt verdampingstekort een handige parameter te zijn. Dit betekent dat voor èèn soort remote sensing parameter, meerdere potentiële toepassingen bestaan (b.v. beregenen, water aanvoer, optimaal grondwater regime). Het is aanbevelingswaardig te bestuderen in hoeverre en op welke wijze de in dit onderzoek geïllustreerde verdampingsmethode ‘on-line’ op een centrale – voor iedereen toegankelijke - plaats kan worden neergezet. Waterbeheerders, modellers en technisch adviseurs moeten de gegevens vrijelijk en snel kunnen krijgen. Elke doelgroep kan dan eigen ervaring opbouwen. Door op landelijk niveau gezamenlijk in de remote sensing techniek te investeren, kan de prijs per oppervlakte of per gebruiker dalen. Vooral het direct beschikbaar zijn van historische verdampingsreeksen kan zeer effectief zijn voor het uitvoeren van hydrologische studies.

<sup>5</sup> Het opzetten van praktische remote sensing studies was ook de belangrijkste aanbeveling van een International Remote Sensing Expert Consultation dat in mei 2001 in Ede/Wageningen is gehouden (BOS ET AL., 2001; www.ilri.nl)

De interne ontsluiting van de remote sensing data is belangrijk voor de verspreiding bij waterschappen en provincies. Het is aan te bevelen data presentabel te maken via GIS tools. Afhankelijk van de toepassing, kan een tool worden gemaakt zoals bijvoorbeeld het berekenen van peilvak gemiddelde waardes van verdampingstekorten.

#### ACADEMISCH ONDERZOEK

Het bestuderen van de nauwkeurigheid van remote sensing schattingen dient zich vooral te oriënteren op de regenval (testen van verschillende kalibratie methodes) en het bodemvochtgehalte. Ofschoon er wel een methode is om bodemvocht te schatten (ook voor bewolkte dagen), is de in deze studie gepresenteerde methode in Nederland nog niet beproefd. Hiertoe dient een speciaal meetprogramma te worden opgezet, analoog aan validatie onderzoek naar regenval. Daarbij moet niet alleen naar het bodemvochtgehalte in de wortelzone worden gekeken, maar ook naar de totale berging van de gehele onverzadigde zone zodat een link naar de waterbeheerders kan worden gemaakt.

Verder wordt het aanbevolen aan te sluiten bij wetenschappelijk onderzoek op het gebied van graslandproductie en actuele verdamping. Graslanden worden speciaal genoemd omdat deze een groot oppervlakte in Nederland beslaan en deze gebieden relatief homogeen zijn. Verdampingsonderzoek dient verder te worden geïntegreerd met de scintillometer ontwikkelingen van de vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen Universiteit en het KNMI (zie Bijlage 3).

In de afgelopen jaren heeft grondwater als thema centraal gestaan in veel nationale beleidsdocumenten. Remote sensing technieken kunnen geen grondwaterstanden waarnemen, maar wel verdamping, verdampingstekorten en gewasgroei; dat biedt andere en nieuwe mogelijkheden om groeiplaatsfactoren te beschrijven. Als via achtergrond onderzoek meer bekend is over de empirische relaties tussen verdampingstekorten, bodemvocht, bodemtypes en grondwaterstanden, dan kan remote sensing voor het monitoren en verkennen van waterregimes worden ingezet. Hier is klassieke bodemnatuurkunde en agrohydrologie met een moderne tint voor nodig.

## 5.2 KNELPUNTEN EN MOGELIJKE OPLOSSINGEN

De vlakdekkende remote sensing kaarten zijn gevalideerd met onafhankelijk verkregen veldmetingen. Hierbij moet goed bedacht worden dat het vergelijken van vlak- en puntinformatie niet vanzelfsprekend is. Een regenmeter is geen regenradar pixel van 2.5 km X 2.5 km en een eddy-correlatie systeem is geen pixel van 1.1 km X 1.1 km. Deze tekortkomingen kunnen nauwelijks worden vermeden en het is onvermijdelijk dat vaak maar een kleine fractie van de remote sensing resultaten (< 1%) kan worden gevalideerd (tenzij men voor een zuiver homogeen oppervlak of een regionale schaal waterbalans kiest). De oplossing is instrumenten te ontwikkelen die op regionale schaal kunnen meten. De scintillometer is een goed voorbeeld hiervan (<http://www.met.wau.nl/>).

Voor remote sensing metingen geldt hetzelfde als voor andere metingen: de oorzaak van het gemeten verschijnsel is niet bekend. Er kan alleen een toestand worden vastgesteld. De koppeling met GIS bestanden is daarom van belang betere inzichten te krijgen in het 'waarom' achter waargenomen fenomenen. Voor het aandragen van toekomstige situaties dienen

simulatiemodellen te worden gebruikt. Remote sensing kan alleen worden gebruikt om deze hydrologisch modellen voor historische reeksen te ijken.

Een blijvende obstakel voor remote sensing data is dat er alleen onder onbewolkte condities goede satelliet beelden kunnen worden verkregen. Door de hardnekkige bewolking in Nederland kunnen maar enkele heldere beelden per jaar worden gemaakt. Bij voorkeur zouden we een satelliet moeten hebben die elke dag opnamen maakt met een ruimtelijke resolutie van 30 m. We moeten echter met een combinatie van hoge- en lage resolutie satellieten tevreden zijn (Tabel 9). De Europese Ruimtevaart Agent (ESA) heeft al wel een geostationaire satelliet (MSG) gelanceerd die elke 15 minuten een opname bij een resolutie van 1 tot 3 km in de zichtbare en infrarode banden maakt. Daarmee neemt de kans op onbewolkte beelden enorm toe. De ruimtelijke resolutie op de breedtegraad van Nederland is echter lager dan de huidige NOAA beelden.

Remote sensing geeft een indruk van de actuele situatie. Daarmee is de vraag of de waardes goed zijn niet beantwoord. Het ontbreekt nog aan een referentiekader met gewenste en optimale waardes bij verschillende vormen van landgebruik (b.v. een verdampingstekort van 5 mm/week voor natte natuur, 10 mm/week voor de landbouw, een biomassa-groei van 3000 kg/ha/maand voor een vitaal beukenbos, een bodemvochtgehalte van  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  om het land in het voorjaar te gaan bereiden, een bodemvochtgehalte van  $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  om natte planten te laten terugkeren etc.). Slechts bij het vergelijken van actuele en referentiewaardes, kan de waterbeheerder beslissen of de gewenste situatie is bereikt. Een dergelijk raamwerk dient samen met verschillende gebruikers van het landschap te worden opgeleid. Het afleiden van deze streefwaardes moet sowieso gebeuren en staat dus feitelijk los van remote sensing toepassingen.

**TABEL 9** VOOR- EN NADELEN VAN HOGE- EN LAGE RESOLUTIE SATELLIETBEELDEN VOOR HET KWANTITATIEF BESCHRIJVEN VAN HYDROLOGISCHE GEWASGROEI CONDITIES

| Satelliet | Nadeel  | Voordeel  |
|-----------|---|---|
| Landsat   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Genereert ruis in regressie- modellen</li> <li>• De maximale opname frequentie is eenmaal per 16 dagen</li> <li>• Een goede tijdreeks kan niet worden opgebouwd</li> <li>• Relatief duur</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschillen zijn tot op perceelsniveau te bestuderen</li> <li>• Hydrologische aspecten kunnen gewasafhankelijk worden bestudeerd</li> <li>• Mogelijkheden voor ruimtelijke statistiek</li> <li>• Aansluiting bij overige GIS bestanden zoals bodem, kunstmest, drooglegging is mogelijk</li> </ul> |
| NOAA      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruimtelijke resolutie groter dan peilvakken</li> <li>• Detailinformatie uit bestaande hoge resolutie GIS bestanden is niet te benutten groeiseizoen</li> <li>• Pixels zijn onderling niet altijd vergelijkbaar omdat ze een verschil in landgebruik herbergen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dagelijkse opnamen</li> <li>• Mogelijkheid tot sommeren van waardes over een groeiseizoen</li> <li>• Mogelijkheid tot sommeren van gebiedsgemiddelde waardes</li> <li>• Effecten van locale factoren kunnen worden geëlimineerd</li> </ul>   |

De opmars van remote sensing is gering in relatie tot de ontwikkelingen op het terrein van GIS. Voor een gedeelte kan dat worden toegeschreven aan het dure onderzoek en de prakti-

sche beperkingen voor het waterbeheer in het verleden (zie sectie 1.3). Met de komst van nieuwe aardobservatiesatellieten en het verder ontwikkelen van algoritmes zijn er anno 2003 nieuwe mogelijkheden ontstaan. Er worden nu operationele remote sensing producten beschikbaar gesteld voor prijzen die acceptabel zijn (zie bijlage 6) en een nauwkeurigheid die steeds beter wordt (zie bijlagen 1 t/m 4). Dat deze nieuwe vorm van hydrologische gegevens niet of nauwelijks gebruikt wordt, komt door de onbekendheid bij veel gebruikers. De studiedag van STOWA in maart 2002 was een goed initiatief om aan dit knelpunt tegemoet te komen. Dit is niet voldoende, en er zullen meer van dergelijke activiteiten moeten worden georganiseerd wil men de vraag 'hoe kan remote sensing worden ingepast in bestaande monitoring- en onderzoekprogramma's en hoe kan remote sensing gegevens als aanvullende informatie gebruikt worden' kunnen beantwoorden.

# LITERATUUR

AHMAD, M.D., 2002. **Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen Universiteit: 143 pp.

ALLEN, R.G., A. MORSE, M. TASUMI, R. TREZZA, W.G.M. BASTIAANSEN, J.L. WRIGHT, AND W. KRAMBER, 2002. **Evapotranspiration from a Satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho, US-Commission on Irrigation and Drainage**, San Luis Obispo

ASRAR, G., E. KANEMU, R.D. JACKSON AND P.J. PINTER, 1985. **Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data**, Remote Sensing of Environment 17: 211-220

BAKEL, VAN, P.J.T., 1986. **Planning, design and operation of surface water management systems, a case study**, Ph.D. Dissertatie Landbouwniversiteit, Wageningen, ICW Report 13 (special issue), Alterra, Wageningen: 118 pp.

BAKEL, VAN, P.J.T. EN M.F.P. BIERKENS, 1999. **Omgaan met maaiveldshoogteverschillen bij het peilbeheer**, H2O 12: 15-17

BASTIAANSEN, W.G.M., 1995. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**, Ph.D. Dissertatie, Wageningen Universiteit, Vakgroep Waterhuishouding: 273 pp.

BASTIAANSEN, W.G.M., 1998. **Remote sensing in water resources management: the state of the art**, International Water Management Institute (IWMI), CGIAR system, Colombo, Sri Lanka: 118 pp.

BASTIAANSEN, W.G.M., M. MENENTI, R.A. FEDDES AND A.A.M. HOLTSLAG, 1998. **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)**, 1. formulation, J. of Hydr. 212-213: 198-212

BASTIAANSEN, W.G.M., 2000. **SEBAL based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey**, J. of Hydr. 229: 87-100

BASTIAANSEN, W.G.M., H. PELGRUM, G. ROERINK EN K. SOETERIK, 2001. **Soil moisture conditions in the Netherlands during the summer of 1995 interpreted from satellite measurements**, in (eds.) A. van Dijk en M.G. Bos, GIS and Remote Sensing Techniques in Land- and Water Management, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-6788-X: 69-86

BASTIAANSEN, W.G.M. AND S. ALI, 2003. **A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan, Agriculture, Ecology and Environment**, 94(3): 321-340



BELMANS, C., J.G. WESSELING EN R.A. FEDDES, 1983. **Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE**, J. of Hydr. 63: 271-286

BIJKERK, A.J., 1992. **De hydrologische interpretatie voor het proefgebied Gasselternijveen met remote sensing en hydrologische modellen**, Rapport 191, DLO Staring Centrum, Alterra, Wageningen: 98 pp.

BOLT, VAN DER, F.J.E, P. GROENENDIJK EN H.P. OOSTEROM, 1996. **Nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater in de stroomgebieden van de Beerze**, de Reusel en de Rosep, DLO Staring Centrum Rapport 306

BOS, M.G., S. ABDEL DAYEM, W.G.M. BASTIAANSEN EN A. VIDAL, 2001. **Remote sensing for water management: the drainage component, intern rapport Alterra-ILRI**, Wageningen: 52 pp.

BOSVELD, F.C., 1999. **Exchange processes between a coniferous forest and the atmosphere**, Ph.D. Dissertatie, Landbouwuniversiteit, Vakgroep Meteorologie, Wageningen: 181 pp.

BRUIN, DE, H.A.R., B.J.J.M. VAN DER HURK EN W. KOHSIEK, 1996. **The scintillation method tested over a dry vineyard area**, Boundary Layer Meteorology 76: 25-40

BRUTSAERT, W., 1982. **Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications**, Reidel, Dordrecht: 299 pp.

BUITEN, H.J. EN J.G.P.W. CLEVERS, 1990. **Remote sensing, theorie en toepassingen van landobservatie**, ISBN 90-220-1021-X, Pudoc Centrum voor Landbouwpublicaties en landbouwdocumentatie, Wageningen: 517 pp.

DIJK, VAN, A. EN M.G. BOS, 2001. **GIS and Remote Sensing Techniques in Land- and Water Management**, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-6788-X

DOLMAN, A.J. EN E.J. MOORS, 1994. **Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland, Fase 1: toetsing instrumentarium**, DLO Staring Centrum Rapport 333, Wageningen

DROESEN, W.J. EN M.N. JAARMA, 1990. **Toepassingen van remote sensing in de landinrichtingspraktijk**, Eindrapport Ulvenhout-Galder, DLO Staring Centrum Rapport 48, Alterra, Wageningen: 92 pp.

ELBERS, J.A., A.J. DOLMAN, E.J. MOORS EN W. SNIJDERS, 1996. **Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland, Fase 2: meetopzet en eerste resultaten**, Staring Centrum Rapport 333.2, Alterra, Wageningen: 65 pp.

FARAH, H.O., 2001. **Estimation of regional evaporation under different weather conditions from satellite and meteorological data**, Ph.D. Dissertatie, Wageningen Universiteit, Vakgroep Waterhuishouding: 170 pp.

FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK EN H. ZARADNY, 1978. **Simulation of field water use and crop yield, Simulation Nomographs**, Pudoc, Wageningen, 189 pp.

HAKVOORT, H.A.M., R. UIJLENHOET EN J.N.M. STRICKER, 1993. **Accuracy of radar rainfall estimates compared to raingauge measurements and a hydrological application**, Rapport 41, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwniversiteit Wageningen: 69 pp.

HEMAKUMARA, H.M., L. CHANDRAPALA AND A.F. MOENE, 2003. **Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer**, Agr. Water Management 58: 109-122

HOOGHART, J.C., 1990. **Water management en remote sensing**, TNO Verslagen en Mededelingen no. 42, The Netherlands Organization for Applied Scientific Research, ISBN 90-6743-170-2: 146 pp.

JANSE, A.R.P. EN TH.A. DE BOER, 1987, **Met het oog op de aarde**, Het Spectrum, ISBN 90 274 1732 6: 144 PP.

KOHSIEK, W., W. MEIJNINGER EN H.A.R. DE BRUIN, 2002. **Long range scintillometry, proc. int. workshop on Surface Fluxes and Boundary Layer Physics**, Wageningen, July 2002

KROES, J.G., P.J.T. VAN BAKEL, J. HUYGEN, T. KROON EN R. PASTOORS, 2001. **Actualisatie van de hydrologie voor STONE 2.0**, Wageningen, Alterra, Rapport 298, Reeks Milieuplanbureau 16

MEIJNINGER, W.M.L., A.E. GREEN, O.K. HARTOGENSIS, W. KOHSIEK, J.C.B. HOEDJES, R.M. ZUURBIER AND H.A.R. DE BRUIN, 2002. **Determination of area-averaged water vapour fluxes with large aperture and radio wave scintillometers over a heterogeneous surface – Flevoland field experiment**, Boundary-Layer Meteorology 105: 63-83

MEIJNINGER, W.M.L., A. GIESKE AND H.A.R. DE BRUIN, 2003. **Satellite, scintillometer and variance based sensible heat fluxes - an inter comparison study for irrigated crops**, Agr. and Forest Meteorology

NIEUWENHUIS, G.J.A., 1992. **Toepassing remote sensing voor het waterhuishoudingsplan Drenthe**, Staring Centrum Rapport 208, Wageningen: 37 pp.

NIEUWENHUIS, G.J.A., E.H. SMIDT EN H.A.M. THUNNISSEN, 1985. **Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images**, Int. J. of Rem. Sens. 6(8): 1319-1334

NIEVEEN, J.P., 1999. **Eddy covariance and scintillation measurements of atmospheric exchange processes over different types of vegetation**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen University: 121 pp.

OEVELEN, VAN, P.J., 2000. **Estimation of areal soil water content through microwave remote sensing**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen Universiteit: 228 pp.

PELGRUM, H., 2000. **Spatial aggregation of land surface characteristics: impact of resolution of remote sensing data on land surface modelling**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen Universiteit: 151 pp.

PROJECTTEAM, 1985. **Onderzoek naar de mogelijkheden van operationele toepassing van remote sensing technieken in de landbouw en het natuurbeheer**, Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland, ICW Rapport 17, Alterra, Wageningen: 26 pp.

QUERNER, E.P. EN J.P.T. VAN BAKEL, 1989. **Description of the regional groundwater flow model SIMGRO**, Report 7, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands

RANGO, A., EN A.I. SHALABY, 1998. **Operational applications of remote sensing in hydrology: success, prospects and problems**, IAHS Hydrological Sciences Journal, 43(6): 947-967

SCHULTZ, G.A. EN T. ENGMAN, 2000. **Remote sensing in hydrology and water management**, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-64075-4

SCHUURMANS, J.M., P.A. TROCH, A.A. VELDHUIZEN, W.G.M. BASTIAANSEN AND M.F.P. BIERKENS, 2003. **Assimilation of remotely sensed latent heat fluxes in a distributed hydrological model**, Adv. in Water Resources, vol. 26(2): 151-159

SCOTT, C.A., W.G.M. BASTIAANSEN AND M.D. AHMAD, 2003. **Mapping Root Zone Soil Moisture using Remotely Sensed Optical Imagery**, ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering (accepted)

SINTONEN, K., 2001. **Validation of a remote sensing algorithm to estimate evapotranspiration on an operational basis: the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) algorithm**, KNMI and University of Copenhagen: 73 pp.

STOWA, 2002. **Remote sensing in het waterbeheer**, STOWA rapport no. 18, Utrecht: 75 pp.

SOER, G.J.R., 1980. **Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures**, Rem. Sens. Of Env. 9: 27-45

SU, Z. AND C. JACOBS, 2001. **ENVISAT – actual evaporation**, USP-2, 01-05, BeleidsCommissie Remote Sensing, Delft; 58 pp.

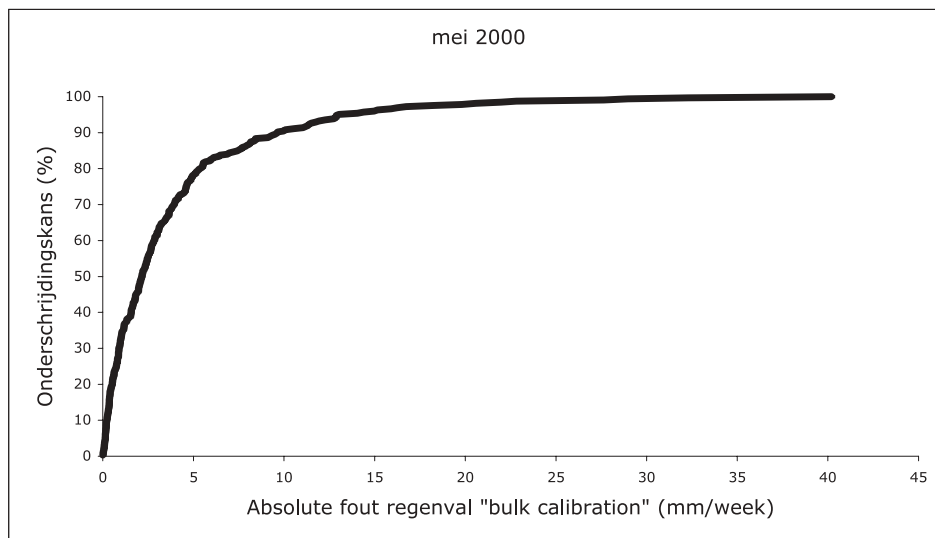
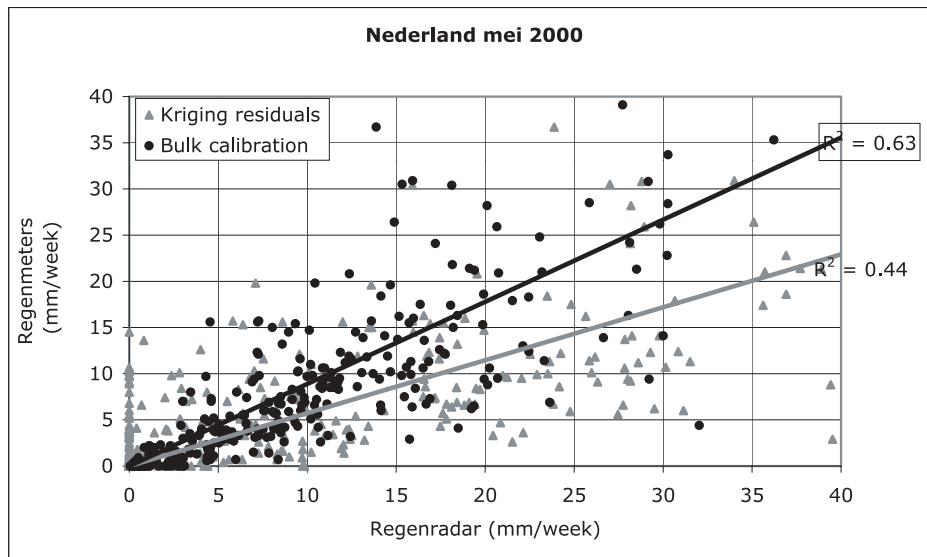
VAREKAMP, C., 2001. **Canopy reconstruction from interferometric SAR**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen Universiteit: 87 pp.

VERHOEF, W., 1998. **Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies**, Ph.D. Dissertatie, Vakgroep Landmeetkunde, Wageningen Universiteit: 310 pp.

VRIES, DE, A., 1999. **Land surface roughness and remote sensing**, Ph.D. dissertatie, Rijksuniversiteit Groningen: 130 pp.

BIJLAGE 1

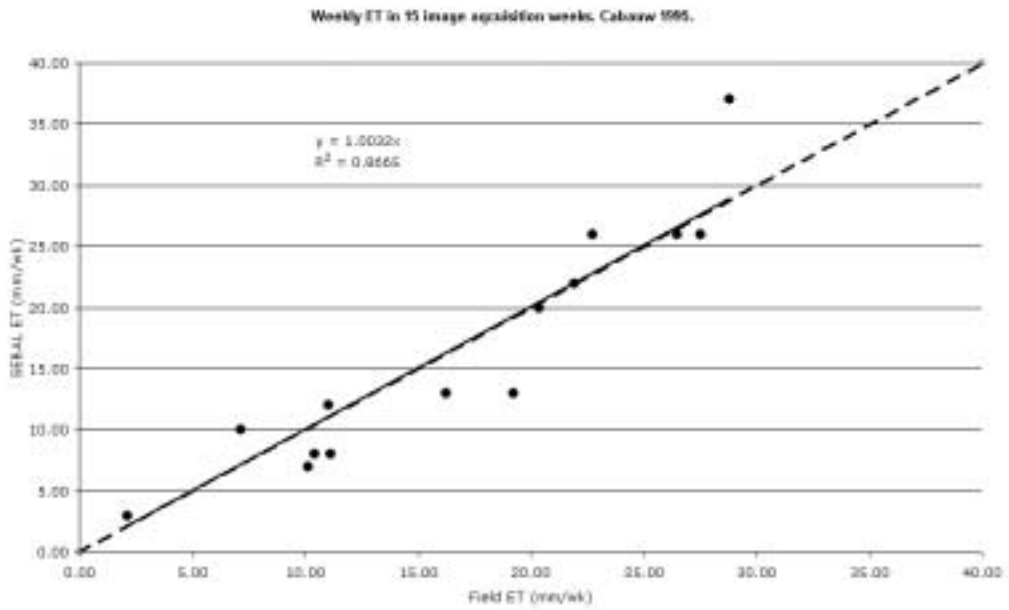
# NAUWKEURIGHEID REGENRADAR NA KALIBRATIE





BIJLAGE 2

# VALIDATIE VAN 1 KM NOAA PIXELS OP VERSCHILLENDE TIJDSCHALEN (NAAR SINTONEN, 2001)





BIJLAGE 3

# VOORBEELD VAN EEN LANGE AFSTAND SCINTILLOMETER METING IN HET GROENE HART

## Long range scintillometry Wim Kohsiek\*, Wouter Meijninger\*\*, Henk de Bruin\*\* KNMI

A 31 cm aperture scintillometer (XLAS) was set up over a distance of 9.8 km. Scintillation derived heat flux is compared to a local measurement and a satellite sensed one.

### 1. Introduction

An optical scintillometer gives a path or area averaged measurement of the sensible heat flux. A path of 10 km might be the practical upper limit. This distance fits well with the grid size of most numerical weather and climate models.

### 2. Scintillation

A scintillometer measures the temperature turbulence of the atmosphere by means of the apparent fluctuations in light intensity of a distant source with constant emission. The basic relation is:

$$\sigma_r^2 = 0.233 C_n^2 D^{7/3} L^2 \quad (1)$$

where  $\sigma_r^2$  the log amplitude variance of the received radiation,  $C_n^2$  is the refractive index structure parameter,  $D$  the transmitter and receiver aperture (here taken equal) and  $L$  the distance between transmitter and receiver.

At large distances Eq. (1) breaks down, however. This is called the region of saturation. A way to avoid saturation is to increase  $D$ . But there are practical limits.

### 3. The XLAS

#### 3.1 The instrument

A 31 cm aperture instrument was built. It uses Fresnel lenses. Such lenses are light weight and relatively cheap. Otherwise the XLAS is similar to the LAS as operated by the Wageningen group.

#### 3.2 Experiment

The transmitter was placed in a TV tower and the receiver in the KNMI meteorological tower at Cabauw (Fig. 1). The path ( $L=9.800$  m) was almost horizontal and at a height of 43 m. The underlying terrain is mainly flat grassland. The XLAS runs continuously since September 2001.



Fig. 1. The XLAS receiver mounted on the 43 m platform of the Cabauw tower.

#### 3.3 Results

From  $\sigma_r^2$  the sensible heat flux is calculated by semi-empirical relations that derive from Monin-Obukhov similarity theory. The heat fluxes  $H_{scat}$  are corrected for saturation by:

$$H_{sc} = (1 + 0.002 H_{sc}) H_{sc} \quad (2)$$

In Fig. 2 the XLAS fluxes are compared with a local eddy correlation measurement at Cabauw.

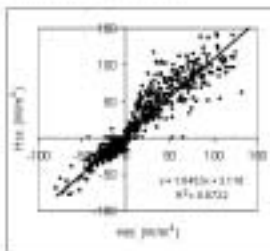


Fig. 2. The sensible heat flux determined with the scintillometer ( $H_{sc}$ ) versus eddy correlation measurement ( $H_{loc}$ ).

Figure 3 gives an example of the daily course on a day with scattered clouds. The averaging effect of the XLAS is clearly seen. The above comparison is of limited value since the heat flux may vary across the optical path. This was investigated by means of a remote sensing technique called SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm). It is a remote sensing method, which can deduce radiation, sensible and latent heat fluxes from visible, near infrared and thermal

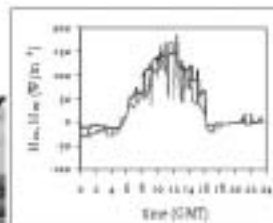


Fig. 3. Daily course of the sensible heat flux on 23 June 2002. The XLAS height eddy correlation. Average over 10 minutes.

infrared satellite data (Bastiaanssen et al., J. Hydrology 1998, vol. 212-213, pp. 208-212). In this study a NOAA 14 (AVHRR) image is used. The image was pre-processed and re-sampled to a  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  pixels. Fig. 4 shows the instantaneous sensible heat fluxes at 13:42 UTC (Day 225, 2000) derived with SEBAL for a area of  $30 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ , straddling Cabauw and the path the XLAS.



Fig. 4. The heat flux of the water Cabauw area. The white patch (only) appears fluxes higher than  $100 \text{ W m}^{-2}$ . For the dark thick patch, nearly open water it is almost zero.

Fig. 5 shows the variations of the SEBAL derived sensible heat fluxes for the pixels along the path of the XLAS. Clearly, the heterogeneity in the area, such as the influence of the town Lopik (that of the Cabauw tower) can be seen.

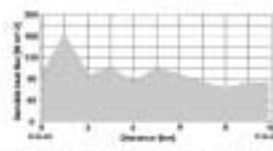


Fig. 5. Distribution of the sensible heat flux along the scintillometer path. The average is  $61.15 \text{ W m}^{-2}$ , whereas the scintillometer gave  $60 \text{ W m}^{-2}$ .

### 4. Conclusion

Using scintillation the average heat flux over a 10 km path can be obtained. The agreement with satellite derived fluxes is encouraging.

\*Royal Netherlands Meteorological Institute, PO Box 201, 3720 AE De Bilt, The Netherlands. E-mail: w.kohsiek@knmi.nl  
\*\*Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Donsvlei 1, 6700 SB Wageningen, The Netherlands

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

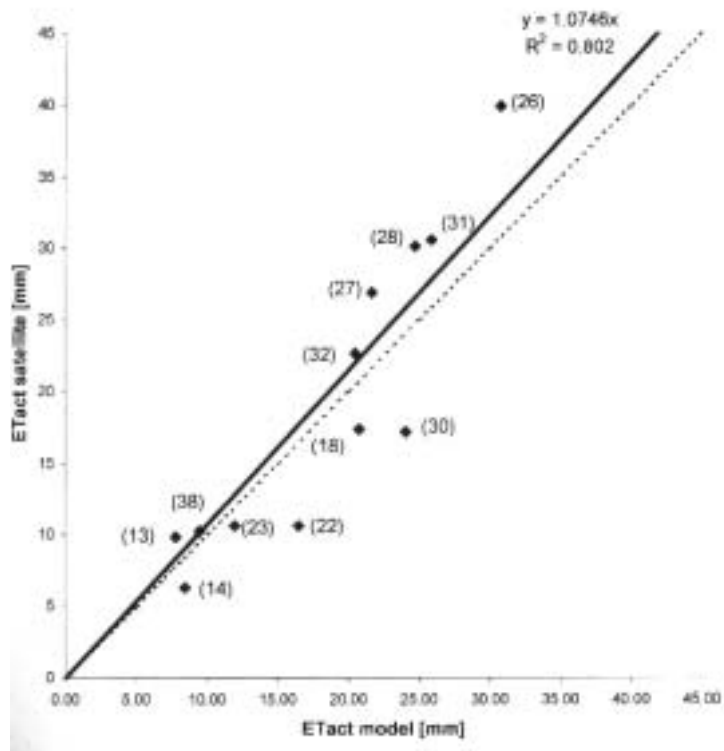




## BIJLAGE 4

# OVEREENKOMST TUSSEN ACTUELE VERDAMPING VERKREGEN MET REMOTE SENSING TECHNIEKEN EN MET HET HYDROLOGISCHE MODEL SIMGRO

(NAAR SCHUURMANS ET AL, 2003)





## BIJLAGE 5

# NAUWKEURIGHEID WEERSVOORSPELLINGEN

## IS DROOG WEER GOED VERWACHT?

### VERWACHTING 2 DAGEN VOORUIT

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 55                  | 32                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 14                  | 51                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 70% (1+4) |

### VERWACHTING 5 DAGEN VOORUIT

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 51                  | 35                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 24                  | 42                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 61% (1+4) |

### VERWACHTING 8 DAGEN VOORUIT

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 42                  | 42                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 27                  | 41                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 55% (1+4) |

#### Bijzonderheden:

- Uit deze tabellen blijkt dat de score van de neerslagverwachting afneemt naarmate de verwachtingstermijn toeneemt. Het gaat hierbij alleen om de vraag: valt er regen of blijft het droog, waarbij de grens voor 'droog' weer bij 1 mm is gelegd.
- Het eerder genoemde punt van een verschuiving van de waarnemingsperiode (10:00-10:00 uur MEZT) t.o.v. de verwachtingsperiode (02:00-02:00 uur MEZT) kan een negatief effect hebben op de scores.
- In het algemeen is er circa 25% 'te nat' verwacht. Het aantal etmalen waarin 'regen' is verwacht, is groter dan het aantal etmalen dat 'regen' is waargenomen.
- 'Droog' weer wordt in het algemeen beter verwacht dan 'regen'. Dit effect neemt af naarmate de verwachtingstermijn langer is.

**OP DE DAGEN DAT ER REGEN GEVALLEN IS, WAS DAN DE HOEVEELHEID JUIST VERWACHT?****VERWACHTING 2 DAGEN VOORUIT**

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 55                  | 32                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 23                  | 42                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 64% (1+4) |

**VERWACHTING 5 DAGEN VOORUIT**

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 51                  | 35                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 24                  | 42                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 61% (1+4) |

**VERWACHTING 8 DAGEN VOORUIT**

|                    | Verwachting 'droog' | Verwachting 'regen' | Totaal             |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Waarneming 'droog' | 42                  | 42                  |                    |
| Waarneming 'regen' | 19                  | 49                  |                    |
| <b>Totaal</b>      |                     |                     | 'goed' = 60% (1+4) |

- De bovenste rijen (waarneming 'droog') zijn gelijk aan die bij onderzoeksvraag 1.
- Op de dagen dat er 'regen' viel (binnen de criteria betekent dat meer dan 1 mm regen), werd er in circa 2/3 van de gevallen goed gescoord. Opvallend is dat de score licht stijgt naarmate de verwachtingstermijn langer wordt. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat er extremer verwacht wordt naarmate de verwachtingstermijn korter is. Daardoor is de kans groter dat de verwachte hoeveelheid buiten de marge rond de waarneming valt en dus 'fout' is. Het kan ook gewoon een kwestie van toeval zijn omdat de dataset niet erg groot is.

**IN DE GEVALLEN DAT ER MEER DAN 5 MM REGEN IS GEVALLEN, WAS DAT JUIST VERWACHT?****VERWACHTING 2 DAGEN VOORUIT**

|                  | Verwachting # 5mm | Verwachting 5mm | Totaal             |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| Waarneming # 5mm | 98                | 13              |                    |
| Waarneming 5mm   | 8                 | 25              |                    |
| <b>Totaal</b>    |                   |                 | 'goed' = 81% (1+4) |

**VERWACHTING 5 DAGEN VOORUIT**

|                  | Verwachting # 5mm | Verwachting 5mm | Totaal             |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| Waarneming # 5mm | 108               | 8               |                    |
| Waarneming 5mm   | 20                | 14              |                    |
| <b>Totaal</b>    |                   |                 | 'goed' = 80% (1+4) |

**VERWACHTING 8 DAGEN VOORUIT**

|                  | Verwachting # 5mm | Verwachting 5mm | Totaal             |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| Waarneming # 5mm | 111               | 6               |                    |
| Waarneming 5mm   | 22                | 13              |                    |
| <b>Totaal</b>    |                   |                 | 'goed' = 82% (1+4) |

- De algemene prestaties lijken goed te zijn (gem. 81%), maar gezien de onderzoeksvraag is dat niet zo vreemd. Het gaat vooral om de 3-de rij in de tabellen (waarneming 5 mm).
- Voor de verwachting van 2 dagen vooruit is de score goed (76%), maar naarmate de verwachtingstermijn toeneemt daalt de score drastisch naar 37% voor de verwachting voor 8 dagen vooruit. Hiervoor zijn twee waarschijnlijke oorzaken aan te geven:
  - de neiging om ver vooruit niet te grote neerslaghoeveelheden te verwachten
  - verschuivingen tussen de gerealiseerde regenval en de verachte regenval op lange termijn ('de regen komt wel, maar een dag later')

**IN DE GEVALLEN DAT ER MEER DAN 10 MM REGEN IS GEVALLEN, WAS DAT JUIST VERWACHT?****VERWACHTING 2 DAGEN VOORUIT**

|                   | Verwachting # 10mm | Verwachting 10mm | Totaal             |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Waarneming # 10mm | 133                | 5                |                    |
| Waarneming 10mm   | 6                  | 6                |                    |
| <b>Totaal</b>     |                    |                  | 'goed' = 91% (1+4) |

**VERWACHTING 5 DAGEN VOORUIT**

|                   | Verwachting # 10mm | Verwachting 10mm | Totaal             |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Waarneming # 10mm | 139                | 2                |                    |
| Waarneming 10mm   | 9                  | 2                |                    |
| <b>Totaal</b>     |                    |                  | 'goed' = 93% (1+4) |

**VERWACHTING 8 DAGEN VOORUIT**

|                   | Verwachting # 10mm | Verwachting 10mm | Totaal             |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Waarneming # 10mm | 139                | 0                |                    |
| Waarneming 10mm   | 11                 | 2                |                    |
| <b>Totaal</b>     |                    |                  | 'goed' = 93% (1+4) |

- De meeste opmerkingen die bij de resultaten van de vorige onderzoeksvraag zijn gemaakt, gaan ook op voor deze onderzoeksvraag.
- Vooral voor lange verwachtingstermijn is er sprake van een 'onderverwachting' van regenhoeveelheden van meer dan 10 mm per etmaal.
- Op een termijn van 2 dagen vooruit is de score 50% 'goed' van in totaal 12 gevallen. Waarschijnlijk zijn de prestaties van de kortere termijn verwachtingen (dag 0 en dag +1) beter, maar dit is niet onderzocht. Ook zal de verschuiving van 8 uur tussen de waarnemingstermijn en de verwachtingstermijn een rol kunnen hebben gespeeld.



## BIJLAGE 6

# KOSTEN VAN REMOTE SENSING TOEPASSINGEN VOOR HYDROLOGISCHE GROEIPLAATSFACTOREN

## EENMALIG LANDSAT OF ASTER BEELD

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Aanschaf één ruw beeld</b>  | € 600 tot € 1500 afhankelijk van leverancier   |
| <b>Prijs standaard product</b> | € 2500 (excl. aanschaf satellietbeeld)   |
| <b>Ruimtelijke resolutie</b>   | variërend tussen 15, 30, 60, 90 en 120 m   |
| <b>Standaard product</b>       | Watergebruik (mm/dag), waterbehoefte (mm/dag), biomassagroei (kg/ha/dag), bodemvocht (-)   |
| <b>Specifiek producten</b>     | Ruimtelijke patronen bodemvocht, gewasgroei <sup>6</sup> , droogte en natschade <sup>7</sup> , beregeningsbehoefte, evaluatie groeiplaatsfactoren, peilbesluiten |
| <b>Prijs specifiek product</b> | product en service afhankelijk   |

Een specifiek product bestaat uit een het combineren van meerdere standaard producten in tijd of het koppelen aan GIS of andere hydrologische informatie

## TIJDSERIES NOAA OF MODIS BEELDEN

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Prijs standaard product</b> | € 10.000 (50,000 ha) tot € 18.000 (200,000 ha) per jaar<br>(excl. aanschaf satellietbeeld)   |
| <b>Ruimtelijke resolutie</b>   | variërend tussen 250, 500, 1000 en 1100 m  |
| <b>Standaard product</b>       | Wekelijkse variatie in gesommeerde waarden van watergebruik (mm/week), waterbehoefte (mm/week), biomassagroei (kg/ha/week) en bodemvocht (-) |
| <b>Specifiek producten</b>     | Veranderingen in bodemvocht, beregeningsbehoefte, beregeningsverboden, aanvoer gebiedsvreemd water, evaluatie groeiplaatsfactoren            |
| <b>Prijs specifiek product</b> | product en service afhankelijk   |

Een specifiek product bestaat uit een het combineren van meerdere standaard producten in tijd of het koppelen aan andere GIS of hydrologische informatie. Het kan ook betrekking hebben op het koppelen van hoge- en lage resolutie beelden.

<sup>6</sup> Digitale gewas classificatie dient aanwezig te zijn

<sup>7</sup> idem



