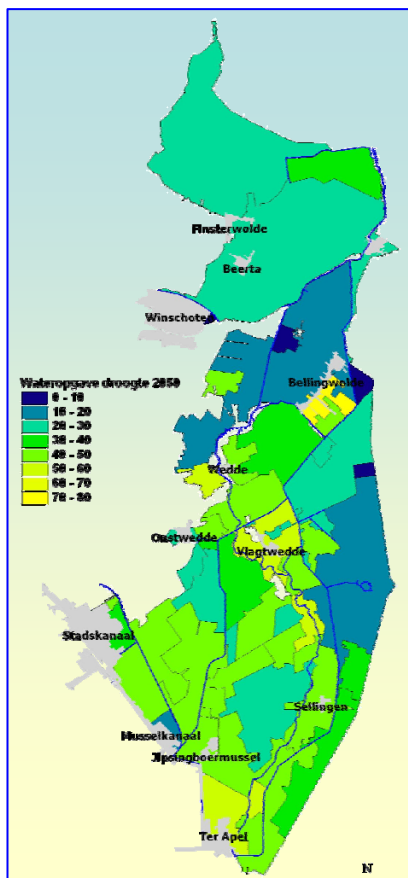




Wateropgave droogte Waterschap Hunze en Aa's:

Westerwolde

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's





Wateropgave droogte Waterschap Hunze en Aa's:

Westerwolde

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Uitvoerder: FutureWater

maart 2005

This project has been co-funded by ERDF through the Interreg IIIB North Sea Region Programme.

Begeleiders: J. den Besten (Waterschap Hunze en Aa's)
H. van Norel (Waterschap Hunze en Aa's)

Auteurs: P. Droogers (FutureWater)
W. Immerzeel (FutureWater)



Voorwoord

Het is duidelijk dat klimaatverandering een invloed zal gaan hebben op hoe we omgaan met water in de toekomst. Het Waterschap Hunze en Aa's wil in het kader van het project Waterdrager de wateropgave droogte kwantificeren. Dit rapport geeft de resultaten weer van een studie waar deze wateropgave droogte is vastgesteld met behulp van remote sensing, waterbalansen en de FutureView methode.

Deze studie is uitgevoerd met hulp van een aantal mensen. De remote sensing beelden zijn geleverd door WaterWatch. Bij Waterschap Hunze Aa's hebben een viertal mensen een belangrijke bijdrage geleverd bij het tot stand brengen van deze studie. Ten eerste zijn dit dhr. J. den Besten en dhr. H. van Norel die de begeleiders van het project waren. Verder hebben dhr. P. Hendriks en dhr. A. Bartelds gegevens aangeleverd en terugkoppeling op de resultaten gegeven. Allen worden bedankt voor de prettige en waardevolle samenwerking.



dr. ing. Peter Droogers
drs. Walter Immerzeel
maart 2005

FutureWater
Generaal Foulkesweg 28
6703 BS Wageningen
tel: 0317 460050
email: info@futurewater.nl

Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE	5
2	OVERZICHT WATERAANVOER	7
3	VERDAMPING	9
3.1	SEBAL methode	9
3.2	Resultaten	10
4	MAANDELIJKE WATERBALANS WATERAANVOERGEBIEDEN	13
4.1	Achtergrond waterbalansen	13
4.2	Resultaten waterbalansen	14
4.3	Waterbalansen juli en augustus	18
5	WATEROPGAVE DROOGTE	21
5.1	FutureView methode	21
5.2	Invoergegevens	23
5.2.1	Rekeneenheden	23
5.2.2	Bodem	24
5.2.3	Meteorologisch gegevens	24
5.2.4	Kwel	24
5.2.5	Gewasgegevens	25
5.3	Validatie referentie	26
5.3.1	Vergelijk met satellietwaarnemingen	26
5.3.2	Vergelijk met grondwaterstanden	27
5.3.3	Conclusie validatie	28
5.4	Resultaten FutureView	28
5.5	Referentie 2003 en effect van wateraanvoer	29
5.6	Wateropgave droogte 2050	31
5.6.1	Algemeen	31
5.6.2	Klimaatscenario's	31
5.6.3	Wateropgave droogte 2050	33
5.7	Effect constante wateraanvoer	34
5.8	Effect halvering wateraanvoer	34
6	CONCLUSIES	41
6.1	Vergelijking verschillende methoden	41
6.2	Analyse huidige situatie	41
6.3	Analyse toekomst	42
7	REFERENTIES	43
	KAARTEN	44

Tabellen

Tabel 1. Enkele eigenschappen van de vier wateraanvoergebieden. Maandelijks kwel voor de vier wateraanvoergebieden in mm per maand. Negatieve waarden zijn wegzijging en positieve waarden zijn kwel.....	13
Tabel 2. Ingaande en uitgaande debietmetingen voor de vier wateraanvoergebieden. Alle debieten zijn omgerekend naar mm zodat aanvoer en afvoer niet geheel gebiedsomvattend hoeven te zijn.	14
Tabel 3. Waterbalans voor de zomer 2003 (april tot en met september). Alle waarden in mm.	15
Tabel 4. Ingaande en uitgaande debieten voor de twee aangepast wateraanvoergebieden. Debieten hebben betrekking op de maanden juli en augustus 2003.	18
Tabel 5. Validatie van FutureView voor de referentiesituatie zomer 2003.....	26
Tabel 6. Opbrengstreductie indien geen wateraanvoer in 2003 zou hebben plaatsgevonden. De waarden in € ha ⁻¹ geeft slechts een globale indicatie weer.	30
Tabel 7. Watertekorten nu en in de toekomst in bodem als gemiddelden voor heel Nederland. (Droogtestudie Nederland 2003).....	31
Tabel 8. Wateropgave droogte 2050 zoals bepaald met FutureView.	33
Tabel 9. Opbrengstreductie voor 2003 (Tabel 11) en 2050 (Tabel 14) bij gelijke infiltratie. De waarden in € ha ⁻¹ geven slechts een globale indicatie weer.	34
Tabel 10. Opbrengstreductie voor 2050 bij gelijke infiltratie als 2003 en bij halve infiltratie. De waarden in € ha ⁻¹ geven slechts een globale indicatie weer.	35
Tabel 11. Resultaten FutureView voor de situatie 2003 normale wateraanvoer.	36
Tabel 12. Resultaten FutureView voor de situatie 2003 geen wateraanvoer.	37
Tabel 13. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met gelijke droogte schade als 2003.	38
Tabel 14. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met gelijke infiltratie als 2003.....	39
Tabel 15. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met infiltratie de helft van 2003.....	40
Tabel 16. Vergelijking van de drie gebruikte methoden. Alle waarden in mm.....	41

Figuren

Figuur 1. Maandelijks potentiële en actuele verdamping en biomassa ontwikkeling voor 2003 voor het hele beheersgebied van Hunze en Aa's, zoals berekend met NOAA SEBAL.....	11
Figuur 2. Maandelijks verdampingstekort voor de periode april tot en met september 2003 voor de vier wateraanvoergebieden zoals bepaald met SEBAL.....	12
Figuur 3. Waterbalans voor 2003 voor het gecombineerde wateraanvoergebied Ter Apelsluis en Vennix. Boven met de oorspronkelijke aan- en afvoer, onder met de gecorrigeerde waarden.	15
Figuur 4. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Ter Apelsluis.	16
Figuur 5. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Vennix.	17
Figuur 6. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Veendam.	17
Figuur 7. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Westerwoldse Aa.	17
Figuur 8. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997).	21
Figuur 9. Relatie tussen de kwel/wegzijging gegevens uit STONE (gebaseerd op NAGROM) en uit TRIWACO. De nummers geven de afwijkende rekeneenheden aan.....	25
Figuur 10. Vergelijking van de actuele verdamping bepaald met het model en met de satelliet voor de 46 rekeneenheden. De nummers geven de afwijkende rekeneenheden aan.	27
Figuur 11. Vergelijking van de berekende grondwaterstanden bepaald met het FutureView model en het grondwatermodel voor de 46 rekeneenheden.	27
Figuur 12. Belangrijkste termen van de waterbalans weergegeven per decade voor de referentiesituatie 2003.	29
Figuur 13. Infiltratie weergegeven per decade voor de drie wateraanvoergebieden.....	30

1 Introductie

Droogte is zelfs voor een relatief nat land als Nederland een probleem en bijna elke zomer treden er wel watertekorten op. Een droge zomer zoals 2003 wordt eens in de 10 à 20 jaar verwacht, terwijl een extreem droge zomer zoals 1976 gemiddeld eens in de honderd jaar optreedt.

Door klimaatverandering zullen watertekorten vaker gaan voorkomen en ernstiger van aard zijn. Droge zomers zullen vaker optreden en het is zeker dat in de komende 50 jaar watertekorten toenemen. Het is onzeker hoe groot die toename zal zijn en globale schattingen variëren van een stijging met 10% tot meer dan een verdubbeling van de watertekorten (Droogtestudie Nederland 2004).

Waterschap Hunze en Aa's is in het kader van het omvangrijke project Waterdrager bezig met het opstellen van een visie en een maatregelenplan per watersysteem. Om hiertoe te komen is een evaluatie gemaakt van benodigde en reeds aanwezige kennis, waaruit de kennisbehoefte naar voren is gekomen. Voor de zes thema's binnen Waterdrager (waterkwaliteit, veiligheid, wateroverlast, droogte, verdroging en waterbodembodem) is deze kennisevaluatie uitgevoerd.

Voor het thema droogte is als ambitieniveau vastgesteld dat de wateropgave droogte begin 2005 moet zijn vastgesteld. In het verleden zijn al een aantal initiatieven genomen om deze wateropgave droogte vast te stellen, waaruit de algemene conclusie naar voren kwam dat er weinig problemen zijn. Een aantal zaken die in deze afgesloten studies niet relevant werden geacht, moeten in het kader van Waterdrager nu integraal worden meegenomen¹:

- zichtjaar visie 2050;
- klimaatverandering;
- ontwikkelingen IJsselmeer;
- regionale spreiding;
- ontwikkeling instrumentarium voor maatregelen.

De kernvraag bij de wateropgave droogte is in welke mate in de toekomst de wateropgave droogte in volume verandert per deelgebied. De wateropgave droogte is hierbij gedefinieerd als: "de hoeveelheid water die **extra** aangevoerd moet worden in 2050 om voor de effecten van klimaatverandering te compenseren".

Het Waterschap Hunze en Aa's kiest hierbij duidelijk voor een pro-actieve aanpak en is het eerste waterschap dat deze wateropgave droogte duidelijk gekwantificeerd wil zien. Gezien de complexiteit van het kwantificeren van de wateropgave droogte zijn bij deze studie een aantal verschillende technieken gecombineerd. Deze verschillende technieken afzonderlijk geven al een beeld van de wateropgave droogte, maar de combinatie ervan maakt het mogelijk om een kwantificatie te geven.

Dit rapport beschrijft een studie waarin op drie ruimtelijke niveaus is gekeken naar deze droogte problematiek wat leidt tot een kwalitatieve uitspraak van de wateropgave droogte:

¹ Een aantal aspecten van belang voor wateraanvoer zullen hier niet worden meegenomen: veranderingen in grondwaterwinningen, doorspoelbehoefte.

- Gehele beheersgebied Remote Sensing: maandelijkse actuele en potentiële verdamping.
- Vier wateraanvoergebieden: maandelijkse waterbalansen.
- Drie wateraanvoergebieden: FutureView-SWAP methode
 - o Evaluatie 2003: werkelijke wateraanvoer
 - o Evaluatie 2003: geen wateraanvoer
 - o Evaluatie 2050: wateropgave droogte
 - o Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003
 - o Evaluatie 2050: verminderde wateraanvoer (helft van 2003)

2 Overzicht wateraanvoer

Wateraanvoer binnen het beheersgebied van Hunze en Aa's vindt plaats vanuit het IJsselmeer via twee aanvoerroutes. De eerste waterinlaat is bij Lemmer en dit water stroomt via de Friese en Noorderzijlvest boezem naar het Groningse gedeelte van het beheersgebied. De tweede inlaat bij het Zwarte Water stroomt via de Hoogeveense Vaart naar de Drentse Veenkoloniën.

Ten tijde van watertekorten die niet voldoende kunnen worden aangevuld door wateraanvoer, heeft het Waterschap een prioriteitenstelling opgesteld (Waterbeheersplan, p. 91):

1. Peilhandhaving ter voorkoming van onomkeerbare klink en voor de stabiliteit van kades, alsmede peilhandhaving ter behoud van de ecologische kwaliteit in gebieden met karakteristieke natuur- en landschapswaarden.
2. Peilhandhaving in water-woonlandschappen en recreatieplassen op het nog acceptabele minimumniveau.
3. Onttrekking aan het oppervlaktewater door industrieën.
4. Peilhandhaving van het primaire wateraanvoersysteem.
5. Doorspoeling van het Eemskanaal ten behoeve van het zoet houden van de voedingsweg.
6. Peilhandhaving in gebieden ten zuiden van het Winschoterdiep en de Westerwoldse Aa.
7. Peilhandhaving in de overige gebieden.
8. Waterstandsverhoging in gebieden ten zuiden van het Winschoterdiep en de Westerwoldse Aa in droge perioden ten behoeve van extra infiltratie².
9. Waterstandsverhoging in de overige gebieden in droge perioden ten behoeve van extra infiltratie.
10. Beregening en bevoeiing uit oppervlaktewater.
11. Peilhandhaving in water-woonlandschappen, recreatieplassen en natuurgebieden op een niveau boven het nog acceptabele minimumniveau.
12. Doorspoeling ten behoeve van verziltingsbestrijding van de overige gebieden.

Het is duidelijk dat met name voor infiltratie (punten 8 en 9) grote hoeveelheden water zijn gemoeid. Veranderingen in waterbehoefte als gevolg van klimaatveranderingen zullen daarom vooral de infiltratie beïnvloeden. Deze studie naar de wateropgave droogte is hier dan ook op gericht en zal de droogte van 2003 als referentie nemen en kwantificeren wat de wateropgave droogte voor 2050 is.

In de Startnotitie "Kennis voor Waterdrager" wordt genoemd dat een schatting van de wateropgave droogte in 2050 ongeveer 6 miljoen m³ bedraagt volgens de stroomgebiedsvisie. Hierbij is ervan uitgegaan dat de huidige wateraanvoer zoals vastgelegd in de waterakkoorden ongewijzigd blijft. Deze aanvoer is maximaal 22,5 m³ s⁻¹ (17,5 m³ s⁻¹ bij Dorkwerd en 5 m³ s⁻¹ via de Hoogeveense Vaart). Per maand is dit dus ongeveer 60 miljoen m³.

² Met de term infiltratie betekent in deze studie: de hoeveelheid water die vanuit het openwater de bodem instroomt.

In de Startnotitie wordt op grond van de Droogtestudie Nederland ook een grove schatting gegeven van de wateropgave droogte 2050. Voor een gemiddeld jaar wordt deze schatting gesteld op 12 miljoen m³, en voor een T=10 jaar op 40 miljoen m³.

3 Verdamping

3.1 SEBAL methode

Verdamping wordt gezien als het proces waar een veelheid van hydrologisch processen integraal tot in uitdrukking komt. Voor een analyse van de droogte in 2003 is deze verdamping bekeken voor het gehele beheersgebied van het Waterschap Hunze en Aa's, waarbij gebruik is gemaakt van de SEBAL remote sensing methode (Bastiaanssen et al., 2003). Een summiere beschrijving van de SEBAL methode zal hieronder worden gegeven, waarbij alleen de algemene principes en uitgangspunten worden genoemd.

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 satelliet meet ook thermisch-infrarode straling waarmee de warmte-uitstraling van het landoppervlak wordt vastgelegd. Een nat oppervlak heeft een hoge verdamping en is daardoor koel; een droog oppervlak heeft een lage verdamping en is daardoor warm. De oppervlaktetemperatuur is daarmee een indirecte maat voor de actuele verdamping.

Via de complexe rekentechniek SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) wordt de straling gemeten door de AVHRR sensor omgezet naar energie fluxen. 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. De energiebalans van het landoppervlak bestaat uit de volgende termen:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E$$

R_n = netto straling, hoeveelheid energie die aan het landoppervlak beschikbaar is ($W\ m^{-2}$)

G_0 = bodemwarmte flux, opwarming van de bovengrond ($W\ m^{-2}$)

H = voelbare warmteflux, opwarming van de luchtlaag boven maaiveld ($W\ m^{-2}$)

λE = latente warmte flux, verdamping ($W\ m^{-2}$)

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.

De latente warmte flux (λE) 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 ($mm\ d^{-1}$) geschiedt op basis van de dichtheid van water en de latente energie (J) om één kg water te laten verdampen. Deze conversie factoren zijn nagenoeg constant.

De SEBAL energiebalans berekeningen kunnen alleen worden uitgevoerd als de satellietbeelden onbewolkt zijn. Het resultaat van λE wordt dan gebruikt om r_s actuele oppervlakte weerstand voor verdamping te kwantificeren. Door de inversie van de Penman-Monteith vergelijking kan r_s voor onbewolkte dagen en voor elke pixel worden uitgerekend (SEBAL levert immers λE 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. 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 maandwaardes afgeleid.

3.2 Resultaten

Voor het gehele jaar 2003 zijn met behulp van de SEBAL methode wekelijkse verdampingskaarten gemaakt voor het gehele beheersgebied van het Waterschap Hunze en Aa's. Naast het landgebruik (Kaart 2) is de gemiddelde actuele verdamping voor de maanden mei, juni, juli en augustus 2003 weergegeven in Kaart 3 tot en met Kaart 6. De grotere woonkernen (Groningen, Assen, Hogezaand-Sappermeer, Winschoten, Veendam en Stadskanaal) komen naar voren als gebieden met een relatief lage actuele verdamping. De openwateroppervlakten, zoals het Zuidelaardermeer en het Schildmeer, komen duidelijk naar voren als gebieden waar de verdamping hoog is.

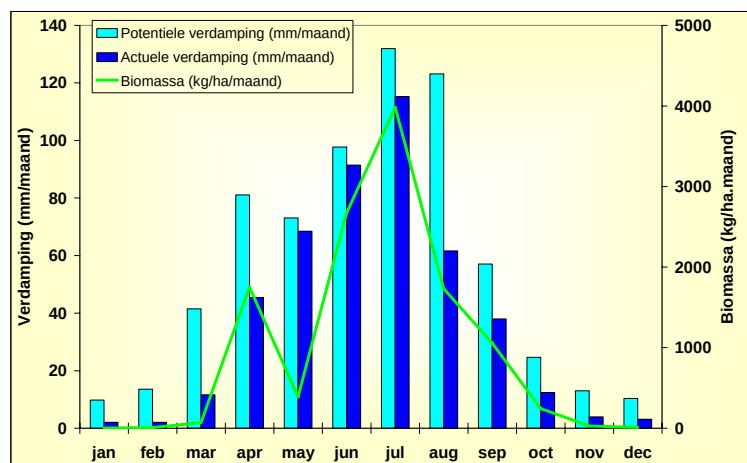
De actuele verdamping is het hoogst in juli ($\sim 120\ mm$) en het laagst in augustus ($\sim 65\ mm$) en voor alle drie de zomermaanden is een ruimtelijk gradiënt van noord-oost naar zuid-west waar te nemen. In het noord-oosten van het beheersgebied wordt vooral graan verbouwd, terwijl in het zuid-westen vooral bos voorkomt hetgeen de ruimtelijk trend verklaart. De piek van het groeiseizoen valt in de maand juli, wat de hoge actuele verdamping tot gevolg heeft. In augustus is de actuele verdamping enorm afgenomen en gemiddeld bijna twee keer zo klein als in juli. Hier zijn twee oorzaken voor. De voornaamste reden is dat er veel meer neerslag opgetreden is in de maand juli ($\sim 80\ mm$) dan in augustus ($\sim 15\ mm$). Naast het grote verschil in neerslag speelt ook het feit dat er in augustus met name granen geoogst worden een rol, wat naar voren komt uit de lagere verdamping in vooral het noordoostelijke graangebied.

Naast de actuele verdamping wordt met het SEBAL algoritme ook de potentiële verdamping berekend. Het verschil tussen actuele en potentiële verdamping is gedefinieerd als het verdampingstekort en is indicatief voor de verdrogingssituatie. In Kaart 3 tot en met Kaart 6 zijn voor de maanden mei tot en met augustus respectievelijk de potentiële verdamping, de actuele verdamping, de biomassa productie en het verdampingstekort afgebeeld. Deze biomassa is de totale hoeveelheid geproduceerd gewas en is dus veel groter dan het oogstbare product. Vanuit de satelliet kan het zuivere oogstbare product niet worden waargenomen, maar met behulp van de zogenoemde "harvest index" kan hier wel een schatting voor gegeven worden.

De potentiële verdamping in augustus is relatief hoog (~ 120 mm). Potentiële verdamping wordt vooral bepaald door de hoeveelheid inkomende kortgolvlige zonnestraling, de gemiddelde windsnelheid en de relatieve luchtvochtigheid. Er is een zwakke afnemende ruimtelijk gradiënt van zuid-oost naar noord-west. Het gemiddelde verdampingstekort in het beheersgebied ligt rond de 60 mm voor augustus 2003. Bij benadering is dit ongeveer 50% van de potentiële verdamping, waaruit geconcludeerd mag worden dat augustus 2003 inderdaad erg droog is geweest.

Het oostelijk deel van het beheersgebied laat het hoogste verdampingstekort zien. In dit gebied liggen ook de vier wateraanvoer gebieden, hetgeen het vermoeden bevestigt dat de water tekorten hier zelfs in de huidige situatie (voor een droog jaar) het grootst zijn. Het graangebied in het noord-oosten van het beheersgebied heeft een relatief hoog verdampingstekort. Dit gebied heeft in de maand augustus ook een duidelijk lagere biomassa productie, wat resulteert in een lage actuele verdamping en een hoog verdampingstekort. Omdat in de maand augustus de granen worden geoogst is de biomassa productie relatief laag. De stedelijke gebieden hebben een relatief hoge verdampingstekort en de meren een laag verdampingstekort. Duidelijk is dat het verdampingstekort wordt veroorzaakt door water tekort.

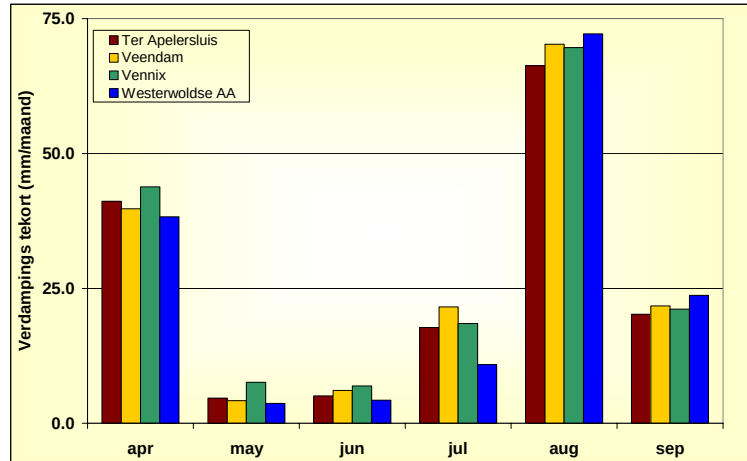
Behalve in de maand augustus is het ook van belang het verloop van actuele en potentiële verdamping te volgen gedurende het jaar. In Figuur 1 zijn de actuele en potentiële verdamping en de biomassa productie per maand weergegeven. Er is een duidelijke jaarlijkse trend waarneembaar en naast augustus treedt ook in april al een aanzienlijke verdampingstekort op, hetgeen gevolgd wordt door een sterke afname van de biomassa in mei. Dit wordt veroorzaakt door droogtestress aan het gewas, maar ook door de verminderde zonnestraling als gevolg van bewolking. De verdampingstekorten in mei en juni liggen rond de 5-10 mm, 20 mm in juli en de droogste maand is augustus met een tekort van ongeveer 60 mm.



Figuur 1. Maandelijkse potentiële en actuele verdamping en biomassa ontwikkeling voor 2003 voor het hele beheersgebied van Hunze en Aa's, zoals berekend met NOAA SEBAL.

Analyse van potentiële en actuele verdamping geeft een goed beeld van wanneer er verdroging ontstaat en welke landgebruiktypen er het meest gevoelig voor zijn. Er kunnen echter geen kwantitatieve uitspraken worden gedaan over de oorzaak van deze tekorten. Om de oorzaak van deze

tekorten te kunnen verklaren wordt in het volgende hoofdstuk een meer gedetailleerde waterbalans opgesteld voor elk van de vier wateraanvoergebieden. Bij deze analyse worden ook de wateraanvoer en waterafvoer gegevens meegenomen en wordt duidelijk of tekorten ontstaan door lage neerslag, een afwijkende aan/afvoer gedrag, of ruimtelijke verschillen in kwel of wegzijging.



Figuur 2. Maandelijks verdampingstekort voor de periode april tot en met september 2003 voor de vier wateraanvoergebieden zoals bepaald met SEBAL.

4 Maandelijkse waterbalans wateraanvoergebieden

4.1 Achtergrond waterbalansen

Binnen het waterschap Hunze en Aa's zijn vier wateraanvoergebieden vastgesteld waarvoor de maandelijkse waterbalansen zijn opgesteld (zie Kaart 1 en Tabel 1):

- Westerwoldse Aa
- Ter Apelersluis
- Vennix
- Veendam

Westerwoldse Aa, Ter Apelersluis en Vennix liggen in het watersysteem Westerwolde, terwijl Veendam in het watersysteem Veenkoloniën liggen.

Tabel 1. Enkele eigenschappen van de vier wateraanvoergebieden. Maandelijkse kwel voor de vier wateraanvoergebieden in mm per maand. Negatieve waarden zijn wegzijging en positieve waarden zijn kwel.

Gebied	Watersysteem	Oppervlakte (ha)	Kwel (mm m ⁻¹)
Ter Apelersluis	Westerwolde	15198	-0.96
Vennix	Westerwolde	8960	-0.11
Westerwoldse Aa	Westerwolde	18376	2.25
Veendam	Veenkoloniën	14113	-13.92

Per wateraanvoergebied is de waterbalans bepaald op maandbasis waar de volgende gegevens zijn gebruikt:

- Aanvoer door kanalen zoals gemeten op verschillende locaties;
- Afvoer door kanalen zoals gemeten op verschillende locaties;
- Neerslag van 16 meteorologische stations;
- Actuele verdamping van de SEBAL Remote Sensing methode;
- Kwel van de STONE-NAGROM kaart.

Voor wat betreft de debietmetingen zijn voor 14 kunstwerken aan- en afvoergegevens beschikbaar (Kaart 7). De debietmetingen hebben betrekking op verschillende perioden (hydrologisch jaar 2003 of kalenderjaar 2003), maar zijn alle recentelijk opnieuw gekalibreerd (Johannes, 2004).

Aangezien het merendeel van de aan- en afvoergebieden van de debietmetingen niet samenvallen met de vier wateraanvoergebieden zijn een aantal aannames gedaan die per wateraanvoergebied zullen worden besproken. Een essentiële stap om deze discrepantie te overbruggen is om alle debietmetingen in m³ om te zetten naar mm. Hierdoor is het mogelijk om debietmetingen toe te wijzen aan de aanvoergebieden. Impliciet wordt hiermee aangenomen dat het gebied waarop de debietmeting is gedaan, redelijk homogeen van karakter is.

4.2 Resultaten waterbalansen

Bij het bepalen van de waterbalansen voor 2003 voor de vier wateraanvoergebieden vormden de aan- en afvoerdebieten de essentiële schakel. In Tabel 2 staan de gebruikte metingen voor de vier wateraanvoergebieden. In sommige gevallen is de aanvoer of de afvoer een aftrekpost van twee debieten. Aangezien er slechts een beperkt aantal meetlocaties beschikbaar zijn, hebben de gegevens zoals vermeld in Tabel 2 niet altijd betrekking op het gehele gebied. Zoals eerder vermeld zijn de debieten daarom omgezet naar mm. Aangezien ook de oppervlakte waarop de metingen betrekking hebben niet altijd precies bekend zijn en vaak ook niet constant in de tijd zijn, bracht dit een extra onnauwkeurigheid met zich mee.

Om de balansen op te stellen is tevens de actuele verdamping nodig. Hiervoor zijn de resultaten van de SEBAL remote sensing methode gebruikt zoals besproken in de vorige paragraaf.

Tabel 2. Ingaande en uitgaande debietmetingen voor de vier wateraanvoergebieden. Alle debieten zijn omgerekend naar mm zodat aanvoer en afvoeren niet geheel gebiedsomvattend hoeven te zijn.

Gebied	Ingaande debieten	Uitgaande debieten
Ter Apelersluis en Vennix	Ter Apelersluis Vennix-Ter Apelkanaal	Veelerveen Wedde
Ter Apelersluis	Ter Apelersluis	Veelerveen Wedde
Vennix	Vennix-Ter Apelkanaal	Veelerveen
Westerwoldse Aa	-	Hongerige Wolf Fiemel
Veendam	Veendam-Vennix	Pekelderhoofddiep Veendam-Vennix

De wateraanvoergebieden Vennix en Ter Apelersluis zijn in eerste instantie samengevoegd voor het bepalen van de maandelijkse waterbalans, omdat de afvoergegevens van Stuw Veelerveen betrekking hebben op beide gebieden.

Voor het hydrologische jaar 2003 is de maandelijkse waterbalans te zien voor dit gecombineerde gebied Vennix – Ter Apelersluis in Figuur 3. De begrippen “aanvoer” en “afvoer” hebben betrekking op alle debieten die het gebied instromen c.q. uitstromen. Het begrip aanvoer heeft dus ook betrekking op de hoeveelheid water die door het gebied stroomt naar een lozingspunt.

Uit Figuur 3 (boven) blijkt dat de waterbalans niet gesloten is en er bijna elke maand meer water uitgaat (afvoer en verdamping), dan dat er in komt (neerslag, aanvoer, kwel). Een niet gesloten waterbalans is logisch voor extreem droge en extreem natte maanden, aangezien dit het verschil weergeeft tussen bodemvocht en oppervlaktewater voorraad. Voor een geheel jaar zal de balans in het algemeen echter dicht bij nul liggen, terwijl het verschil nu op 1,0 mm d⁻¹ ligt. Gezien de complexiteit (en daardoor eventuele meetfouten) van de aan- en afvoerdebieten zijn deze gecorrigeerd om een sluitende jaarlijkse waterbalans te verkrijgen Figuur 3 (onder).

Deze correctie is voor alle waterbalansen uitgevoerd en was relatief klein:

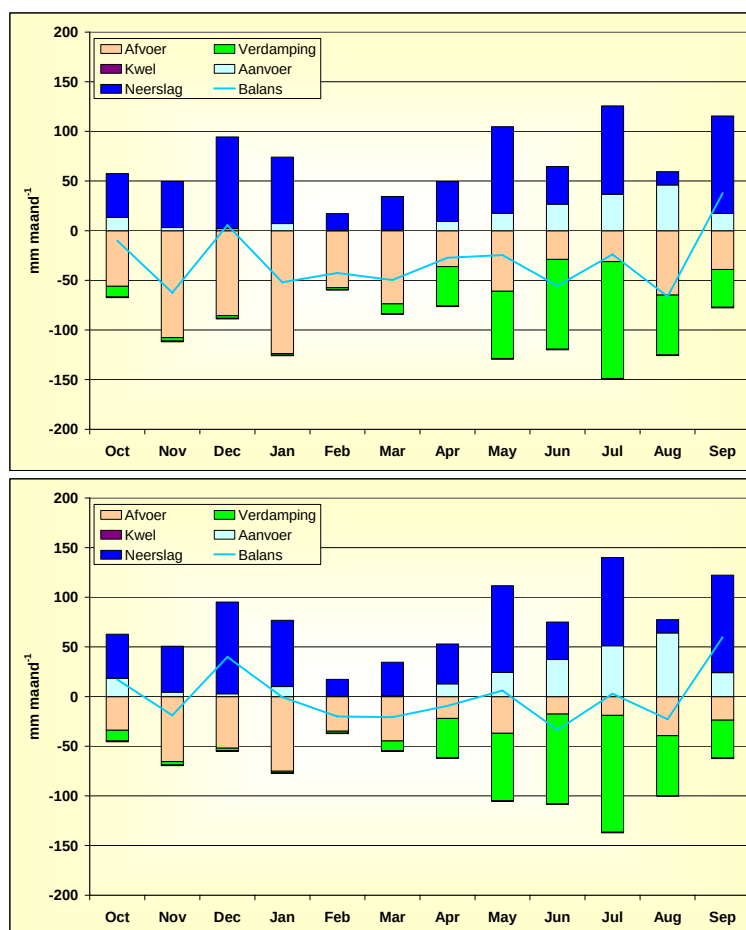
- Ter Apelersluis: -0,9 mm d⁻¹
- Vennix: -0,4 mm d⁻¹
- Westerwoldse Aa: +0,2 mm d⁻¹
- Veendam: 0,0 mm d⁻¹

Voor alle vier wateraanvoergebieden is de actuele verdamping iets groter dan neerslag voor de zomerperiode (Tabel 3). De laagste verdamping is voor het Westervoldse Aa aanvoergebied doordat de daar aanwezige granen eerder zijn geoogst dan de andere gewassen in de andere gebieden. Interessant is nog dat voor dit gebied de neerslag ook groter is dan voor de andere wateraanvoer gebieden.

Tabel 3. Waterbalans voor de zomer 2003 (april tot en met september). Alle waarden in mm.

	Neerslag	Verdamping	Aanvoer	Kwel	Balans
Ter Apelersluis en Vennix	365	414	55	-4	3
Ter Apelersluis	368	420	35	-6	-23
Vennix	360	402	38	-1	-5
Westervoldse Aa	394	399	0	14	9
Veendam	376	403	96	-84	-15

Noot: negatieve kwel betekent wegzijging; balans negatief is minder water in gebied aan het eind van de zomer.



Figuur 3. Waterbalans voor 2003 voor het gecombineerde wateraanvoergebied Ter Apelersluis en Vennix. Boven met de oorspronkelijke aan- en afvoeren, onder met de gecorrigeerde waarden.

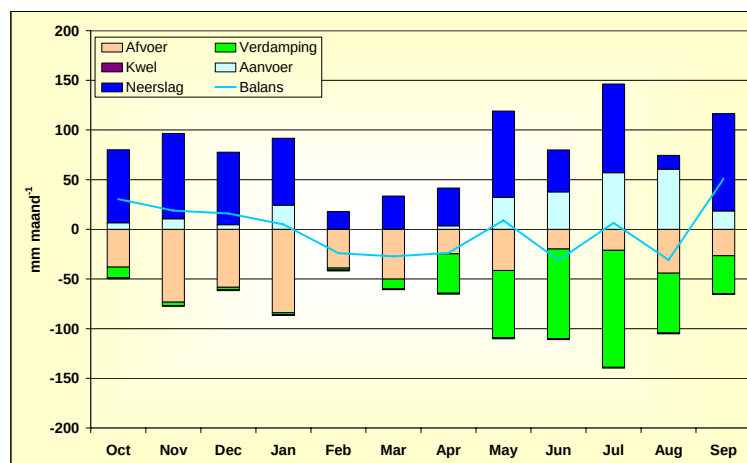
Het verschil tussen alle aanvoer- en afvoercomponenten, de balans in Tabel 3, is het verschil tussen de hoeveelheid water in het gebied aan het begin en aan het eind van de zomer. Dit heeft betrekking op de hoeveelheid water in het openwater, maar zal vooral veroorzaakt zijn door bodemvocht veranderingen. Het is duidelijk dat er aan het eind van de zomer minder water aanwezig is dan aan het begin. Belangrijk hierbij is om in ogenschouw te nemen dat fouten in metingen voor een groot gedeelte zijn geëlimineerd doordat de jaarlijkse waterbalans gecorrigeerd is naar een gesloten balans.

Enigszins merkwaardig is dat voor de gezamenlijke Ter Apelersluis en Vennix, de waterbalanstermen niet een gemiddelde vormen van de twee afzonderlijke wateraanvoergebieden. Voor de neerslag, de verdamping en de kwel is dit wel het geval, maar voor de aan- en afvoer niet. Hieruit blijkt dat de nauwkeurigheid van de debietmetingen niet hoog genoeg is.

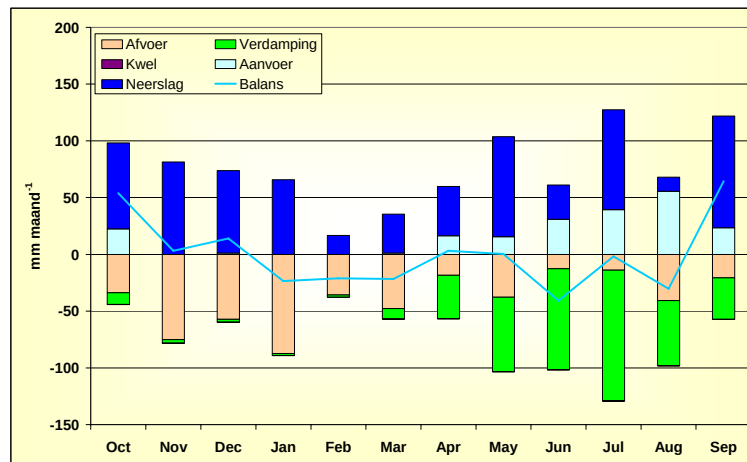
De aanvoer naar de vier gebieden vertoont een grote spreiding. Naar het Westerwoldse Aa gebied is geen duidelijke wateraanvoer, alhoewel natuurlijk wel water dat via De Bult en vooral via Stuw Veelerveen stroomt, uit het Verenigd Kanaal wordt gebruikt voor infiltratie. Vooralsnog zijn de debiet gegevens voor het wateraanvoergebied Westerwoldse Aa niet voldoende om hier een duidelijke aanvoer component te bepalen. Uit de FutureView analyse zal dan ook moeten blijken waar en hoeveel er uiteindelijk geïnfiltreerd is.

De aanvoer voor de wateraanvoergebieden Ter Apelersluis en Vennix zijn van gelijke grootte en bedragen ongeveer tussen de 30 en 40 mm, uitgedrukt over de gehele oppervlakte. Er zullen dus deelgebieden en percelen zijn die minder krijgen en er zullen er zijn die meer krijgen. Dit hangt af van de drooglegging, grondwater, bodem en kwel/wegzijging.

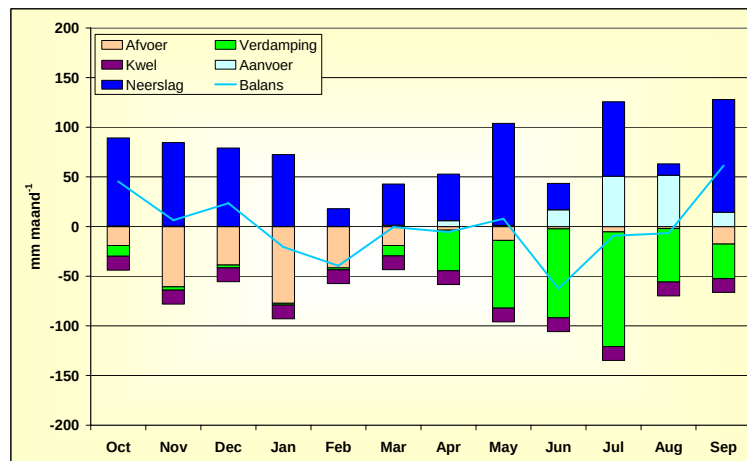
Voor het wateraanvoergebied Veendam is de aanvoer veel groter en bedraagt bijna 100 mm. Deze grotere aanvoer in vergelijking met de andere drie wateraanvoergebieden hangt samen met de grote wegzijging in dit gebied.



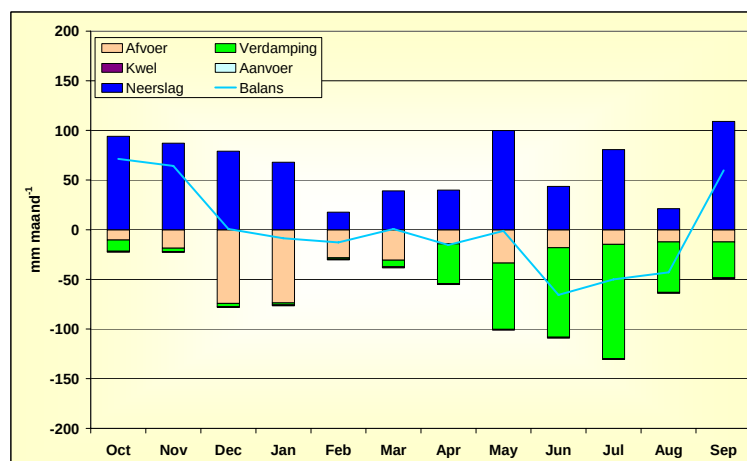
Figuur 4. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Ter Apelersluis.



Figuur 5. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Vennix.



Figuur 6. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Veendam.



Figuur 7. Waterbalans voor 2003 voor het wateraanvoergebied Westerwoldse Aa.

4.3 Waterbalansen juli en augustus

Gezien de complexiteit van de wateraanvoer en de waterafvoer uit de verschillende gebieden, zijn de debietmetingen uit de voorgaande sectie waarschijnlijk minder betrouwbaar. Eén van de belangrijkste factoren is dat aanvoer en afvoer soms via hetzelfde kunstwerk plaatsvindt en dat debietmetingen geldig zijn voor verschillende arealen voor verschillende perioden van het jaar. Ook zijn er een flink aantal kunstwerken waar geen debietmetingen plaatsvinden, maar waar toch een substantiële hoeveelheid water over stroomt gedurende enkele perioden in het jaar.

Er zijn daarom voor een beperkte periode en een beperkt gebied waterbalansen opgesteld. Hierbij is uitgebreid gebruik gemaakt van de lokale gebiedskennis en voor kunstwerken waar geen debieten voor beschikbaar waren zijn zo goed mogelijk schattingen gemaakt.

Voor de wateraanvoergebieden Vennix en Ter Apelersluis zijn de gebiedsgrenzen enigszins aangepast en zijn de waterbalansen voor de maanden juli en augustus 2003 opgesteld. De belangrijkste aannames hierbij zijn:

- Balansen zijn gebaseerd op gemeten aanvoer voor:
 - o gemaal Vennix
 - o inlaat Terapelersluis
 - o stuw Zevende Verlaat
- De Lokkersluis is gelijkgesteld aan de Zevende Verlaat (gemiddelde overstort 6 cm).
- Gegevens van Smeerling zijn gebaseerd op juni 2004.
- Eindstuwen van de verschillende strengen gesteld op een overstorthoogte van 4 cm en een kruinbreedte van 1,50 m.

Op grond van deze aannames is de uiteindelijke waterbalans opgesteld en weergegeven in Tabel 4. De totale netto aanvoer voor het gebied Vennix voor de maanden juli en augustus 2003 blijkt 85 mm te zijn en voor dezelfde periode 61 mm voor het Ter Apelersluis gebied.

Tabel 4. Ingaand en uitgaande debieten voor de twee aangepast wateraanvoergebieden. Debieten hebben betrekking op de maanden juli en augustus 2003.

Vennix (12246 ha)					
<i>In</i>	<i>m³</i>	<i>mm</i>	<i>Uit</i>	<i>m³</i>	<i>mm</i>
Vennix	17.471.160	143	Smeerling	1.681.258	14
Zevende Verlaat	1.749.133	14	Terapelersluis	7.871.683	64
Lokkersluis	1.749.133	14	Eindstuwen Vennix	1.064.408	9
Totaal in	20.969.426	171	Totaal uit	10.617.349	87
Netto in	10.352.077	85			

Terapelersluis (8850 ha)					
<i>In</i>	<i>m³</i>	<i>mm</i>	<i>Uit</i>	<i>m³</i>	<i>mm</i>
Terapelersluis	7.871.683	89	Vlagtweddersluis	1.523.232	17
Eindstuwen Vennix	354.803	4	Voedingsleiding	730.080	8
			Eindstuwen Terapelersluis	591.338	7
Totaal in	8.226.486	93	Totaal uit	2.844.650	32
Netto in	5.381.836	61			

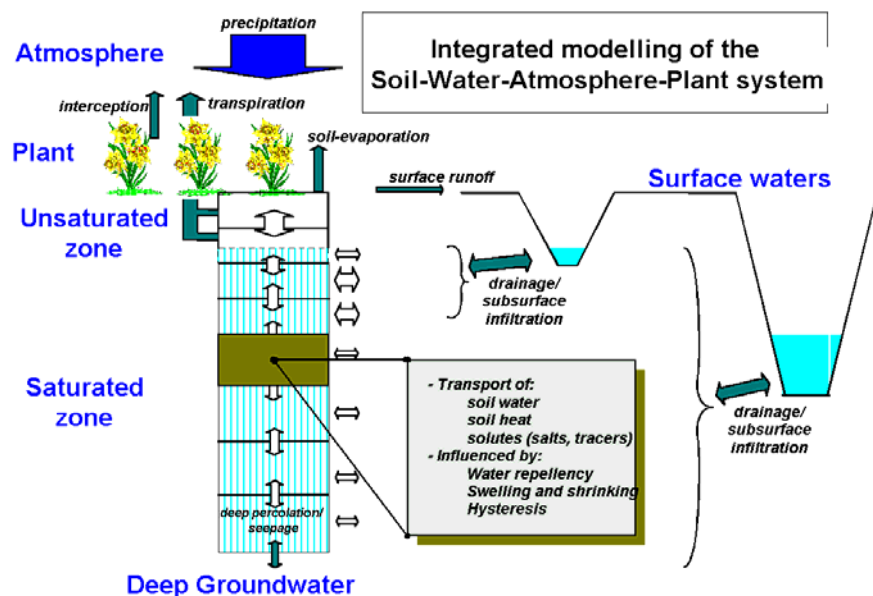
Uit deze gedetailleerde analyses, rekening houdend met de lokale omstandigheden en uitgaande van een zuivere aanvoerperiode, lijken deze waterbalansen nauwkeuriger dan de balansen die afgeleid zijn voor het gehele jaar en de gehele zomer zoals beschreven in 4.2.

5 Wateropgave droogte

5.1 FutureView methode

De FutureView methode is volledig gebaseerd op het SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) model met een actieve koppeling naar een database. FutureView maakt gebruik van rekeneenheden, waarbij een rekeneenheid is gedefinieerd als een homogeen gebied voor wat betreft streefpeil, hoogte, drooglegging, grondgebruik, bodem, drainageweerstand etc. Elke rekeneenheid vormt zo één SWAP kolom.

Het SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant) model simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde/verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. Figuur 8 laat schematisch de werking van het SWAP model zien voor wat betreft de processen in bodem—water—atmosfeer; een uitgebreidere beschrijving kan gevonden worden in Kroes en Van Dam (2003).



Figuur 8. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997).

In het verleden werd voor drainagesystemen vaak gebruik gemaakt van zogenaamde steady-state methoden, waarbij met behulp van een aantal aannames en vereenvoudigingen een redelijke schatting van de gewenste drainage kon worden bepaald. De drainage vergelijkingen van onder andere Hooghoudt (1940) en Ernst (1956) worden wereldwijd toegepast.

Het nadeel van zo een aanpak is de vele vereenvoudigingen en vooral het ontbreken van enige dynamiek in de tijd. Met een model kan deze dynamiek uitstekend gemodelleerd worden en kunnen bovendien andere interacties, zoals met de vegetatie, worden meegenomen.

Het basis concept van ontwatering in het SWAP model berust, evenals bij de interactie van het diepe grondwater met het freatisch grondwater, op de verschillen in stijghoogten en een bepaalde weerstand:

$$q_{drain} = \frac{\phi_{gwl} - \phi_{drain}}{R_{drain}}$$

met q_{drain} : de flux vanuit de bodem naar de drain (cm d⁻¹)
 ϕ_{gwl} : de diepte van de grondwater spiegel (cm)
 ϕ_{drain} : de stijghoogte in de drain (cm)
 R_{drain} : de drainageweerstand (d).

De modelaanpak voor de ontwatering en aftwatering is uitgebreider dan hier beschreven. Zo wordt de drainageweerstand gesplitst in een weerstand vanuit de bodem naar het drainagesysteem (buis, greppel of sloot) en de intree weerstand van het drainagesysteem zelf. Uiteraard is de afstand tussen de verschillende drains een andere belangrijke factor die de totale drainage dynamiek bepaalt. Voor een volledige beschrijving van de representatie van de drainage in het SWAP model wordt verwezen naar Kroes en Van Dam (2003).

In SWAP zijn een aantal opties beschikbaar om gewasgroei te modelleren, waarbij de gewasgroei afhankelijk is van een veelheid aan factoren die complex met elkaar samenhangen. De hier toegepaste methode, is gebaseerd op de concepten zoals beschreven door Doorenbos and Kassam (1979), waarbij de aanname is dat de relatieve groei gelijk is aan de verhouding van de actuele over de potentiële verdamping. Dit kan worden aangevuld met een gevoeligheidsfactor die aangeeft dat een plant gedurende bepaalde groeistadia gevoeliger is voor droogte- of natschade dan gedurende andere perioden. Deze aanpak kan mathematisch worden weergegeven als:

$$1 - \frac{Y_{act}}{Y_{pot}} = K_y \left(1 - \frac{ET_{act}}{ET_{pot}} \right)$$

met Y_{act} : actuele opbrengst (kg ha⁻¹)
 Y_{pot} : potentiële opbrengst (kg ha⁻¹)
 K_y : gevoeligheidsconstante (-)
 ET_{act} : actuele evapotranspiratie (mm)
 ET_{pot} : potentiële evapotranspiratie (mm)

Een verdere beschrijving van het SWAP model kan gevonden worden in diverse andere rapporten, publicaties en websites (<http://www.swap.alterra.nl/>).

5.2 Invoergegevens

5.2.1 Rekeneenheden

Voor de model berekeningen van de FutureView methode is het noodzakelijk het Westerwolde watersysteem te schematiseren in homogene rekeneenheden. Er wordt van uit gegaan dat een rekeneenheid uniform is wat betreft hydrologie, bodem en management. Het gebruik van rekeneenheden in modelstudies is standaard in de hydrologie en er wordt ook wel naar verwezen als *hydrological response units of homogeneous sub-areas* (Droogers and Bastiaanssen, 2002).

Als basis voor de rekeneenheden zijn de stuurgebieden genomen welke zijn vastgesteld in de "Visie peilbeheer" dat door het waterschap is uitgevoerd (Hendriks, 2003). Het Westerwoldse watersysteem bestaat uit de aanvoergebieden Westerwoldse Aa, Ter Apelsluis en Vennix. Voor het noordelijk deel van het Westerwoldse watersysteem zijn geen stuurgebieden vastgesteld en voor dit gebied zijn de peilvakken geassocieerd op zomerpeilen. Deze classificatie is als basis genomen voor de rekeneenheden in het noorden (aanvoergebied Westerwoldse Aa).

Per rekeneenheid is het van belang om aan- en afvoer gegevens toe te kennen. Om die reden zijn de grenzen van deze aan- en afvoergebieden toegevoegd aan de stuurgebieden c.q. geassocieerde zomerpeilen. Ten gevolge van deze samenvoeging zijn een aantal gebieden ontstaan die een klein oppervlakte hebben en niet relevant zijn voor de model berekeningen. Deze gebieden met een oppervlakte kleiner dan 50 hectare zijn samengevoegd met de aangrenzende rekeneenheid met de grootste oppervlakte.

Uiteindelijk zijn met behulp van bovenstaande methode 46 rekeneenheden voor het Westerwolde gebied vastgesteld variërend in oppervlakte van 53 hectare tot 5209 hectare en een gemiddeld oppervlak van 921 hectare. De rekeneenheden zijn weergegeven in Kaart 8.

Na het vaststellen van de rekeneenheden zijn een aantal model parameters vastgesteld voor de rekeneenheden:

- Het afvoergebied en aanvoergebied.
- Het gemiddelde zomerpeil en het gemiddelde winterpeil zijn toegekend. Indien meerdere peilvakken voorkomen binnen één rekeneenheid is het gemiddelde zomer- en winterpeil gebruikt.
- De gemiddelde en minimale maaiveldhoogte op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).
- De gemiddelde drooglegging.
- Aan de hand van de Staringreeks (Wösten et al., 2001) zijn de bodemeenheden van de STIBOKA 1:50000 bodemkaart vertaald naar bodemfysische eigenschappen die van belang zijn voor het model. Per rekeneenheid zijn deze bodemfysische klassen toegekend.
- Landgebruiksfracties voor granen, aardappelen, bieten, gras, loofbos, overige landbouw gewassen.
- Gemiddelde kwel/infiltratie op basis van het NAGROM model.
- Het dichtstbijzijnde meteorologische station.

5.2.2 Bodem

Essentieel voor het bepalen van de wateropgave droogte en de daarmee samenhangende bodem-water processen zijn de bodemeigenschappen. De meest betrouwbare bron van informatie hiervoor is de STIBOKA 1:50.000 bodemkaart. Het grootste gedeelte van de bodemkartering heeft plaatsgevonden in de periode 1968-1972. Het noordelijke gedeelte van de Westerwoldse Aa is tussen 1974 en 1979 gekarteerd. De oorspronkelijke bodemkaart van STIBOKA bevat 760 subgebieden en 167 verschillende bodemeenheden. De STIBOKA kaart bevat alleen kwalitatieve eigenschappen, terwijl voor de FutureView benadering juist kwantitatieve eigenschappen nodig zijn: de zogenaamde bodemfysische eigenschappen (retentie- en doorlatendheidskarakteristieken).

Voor elke rekeneenheid is de dominante bodemeigenschap bepaald en deze zijn omgezet van de kwalitatieve bodemeigenschappen naar de bodemfysische karakteristieken. In de loop der jaren zijn hiervoor technieken ontwikkeld: pedo-transferfuncties. De meest toegepaste is de zogenaamde Staringreeks, waarvan de nieuwste versie hier gebruikt is (Wosten et al., 2001). De uiteindelijke bodemkaart is gebaseerd op de conversietabellen die is samengesteld door de bodemeenheden te vertalen naar de 18 bovengronden en 19 ondergronden volgens Wosten et al. (2001). De uiteindelijke bodemkaart die gebruikt is voor verdere analyse is weergegeven als Kaart 10.

5.2.3 Meteorologisch gegevens

Voor het bepalen van de maandelijkse waterbalansen is gebruik gemaakt van de gegevens van de 16 aanwezige meteorologisch stations in het gebied. Voor de FutureView methode is het echter essentieel dat de wateropgave droogte niet wordt beïnvloed door een toevallige neerslag gebeurtenis bij een bepaald station, maar dat voor het gehele gebied een consistente meteorologische reeks wordt gebruikt. Er is voor gekozen om het station Eelde te nemen, omdat hier ook potentiële verdampingscijfers voor bekend zijn.

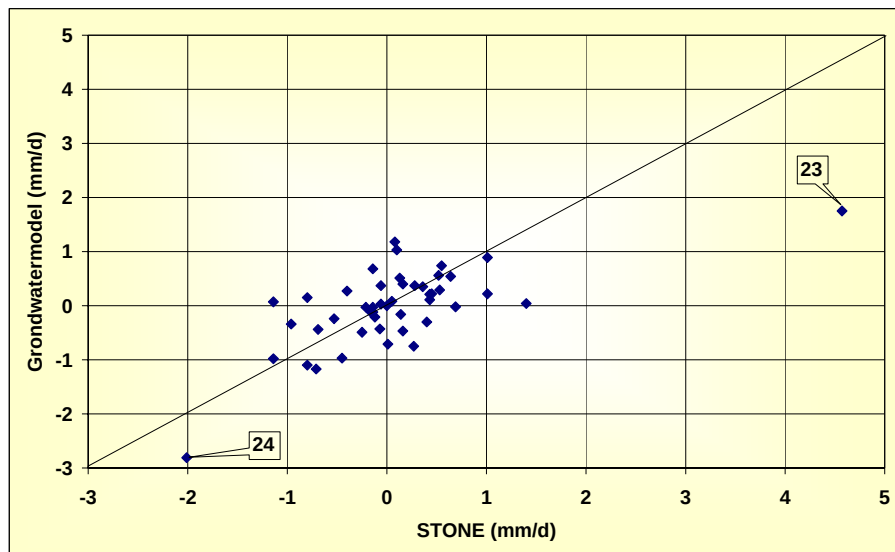
5.2.4 Kwel

Alle analyses zijn uitgevoerd met een veronderstelde bekende onderrandvoorwaarden van de profielen: kwel of wegzijging. FutureView heeft ook de mogelijkheid om deze kwel en wegzijging te bepalen, maar de nadruk van deze studie ligt op het bepalen van de wateropgave droogte, waarbij een groter aantal bekende randvoorwaarden de analyse nauwkeuriger maakt. De kwel gegevens gebuikt bij deze studie zijn afkomstig van de NAGROM dataset. NAGROM is het landsdekkende, stationaire grondwatermodel van Rijkswaterstaat (NAtionaal GROnwater Model) voor het diepe grondwater (<http://www.tauw.nl/NL/producten/waterbeheer/nagrom/nagrom.htm>). De gegevens van NAGROM zijn integraal gebruikt in het STONE instrumentarium, waar ook drainage en slootafstandgegevens van zijn gebruikt.

De NAGROM kwel/wegzijging gegevens zijn opgeschaald naar rekeneenheid niveau en zijn te zien in Kaart 10. Door dit aggregeren vallen de soms lokaal grote verschillen weg, wat gezien de doelstelling van deze studie geen belemmering is. Hierdoor is de kwel/wegzijging voor elk deelgebied meestal niet groot en ligt over het algemeen tussen de 2 mm kwel en 2 mm wegzijging. Het gebiedje ten oosten van Bellingwolde laat een hoge kwel zien, maar dit zou mogelijk een gevolg kunnen zijn van een

onnauwkeurigheid in NAGROM, aangezien de gegevens bij de nationale grenzen van verschillende bronnen afkomstig zijn.

Gedurende de studie is er enige twijfel ontstaan over de NAGROM kwel/wegzijgingskaart en daarom is ook gekeken of een op TRIWACO gebaseerde kwel/wegzijgingskaart andere resultaten geeft. In Figuur 9 is te zien dat de afwijking tussen deze twee datasets voor de meeste rekeneenheden kleiner is dan 1 mm met uitzondering van de rekeneenheden 23 en 24. Dit zijn weer precies twee kleine rekeneenheden aan de grens met Duitsland. Er is daarom besloten om met de oorspronkelijke STONE-NAGROM gegevens verder te gaan



Figuur 9. Relatie tussen de kwel/wegzijging gegevens uit STONE (gebaseerd op NAGROM) en uit TRIWACO. De nummers geven de afwijkende rekeneenheden aan.

5.2.5 Gewasgegevens

SWAP kan gewasgroei simuleren in verschillende mate van detail, afhankelijk van de vraag en de hoeveelheid gegevens. Aan de ene kant kan gebruik gemaakt worden van het zeer gedetailleerde WOFOST model, wat relatief veel specifieke invoergegevens betreffende het gewas nodig heeft en met name bedoeld is voor modelleren op perceel schaal niveau. Aan de andere kant kan SWAP ook simulaties uitvoeren waar geen gewasgroei wordt meegenomen en alleen bodem-water processen worden doorgerekend.

Voor deze studie is een tussenweg gekozen, waarbij wel een gewas wordt gesimuleerd maar niet alle details over de verdeling van de biomassa over de verschillende plantonderdelen. Er is gerekend met twee zogenoemde representatieve gewassen. Het eerst representatieve gewas is een gemiddelde van vooral aardappelen, bieten en granen en is toegepast voor het Ter Apellersluis en Vennix wateraanvoergebied. Het tweede representatieve gewas is gebaseerd op granen en is gebruikt voor het Westervoldse Aa gebied.

5.3 Validatie referentie

Als eerste zijn alle hydrologische processen voor het jaar 2003 berekend door SWAP toe te passen voor elke rekenleenheid: de FutureView methode. Deze referentie situatie is gevalideerd aan de hand van een tweetal andere resultaten:

- Verdamping zoals bepaald met satellietwaarnemingen
- GLG waarden uit een grondwaterstudie

5.3.1 Vergelijk met satellietwaarnemingen

Uit Tabel 5 blijkt dat de totale verdamping uit FutureView en SEBAL voor de drie wateraanvoergebieden bijna gelijk is en slechts 5 mm afwijkt. Aangezien de twee methoden volledig onafhankelijk zijn en gebaseerd zijn op verschillende methoden en gegevens kan dit gezien worden als een uitstekende validatie.

Aangezien de wateropgave droogte ook voor de drie wateraanvoergebieden afzonderlijk moet worden bepaald is in Tabel 5 ook deze vergelijking opgenomen. Ook hier blijkt er een grote overeenkomst te zijn tussen de bepalingen met behulp van FutureView en met de remote sensing techniek. Alleen Vennix laat een iets lagere verdamping zien voor de remote sensing in vergelijking met FutureView. Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in de oppervlakte bebouwing. Deze bebouwing heeft een lagere verdamping dan het landelijk gebied en is wel meegenomen met de satelliet waarnemingen en niet met FutureView.

De bevestiging voor de hypothese is te zien in Figuur 10 waar voor de 46 rekenleenheden de vergelijking tussen de FutureView en satelliet verdamping is weergegeven. De twee afwijkende punten zijn rekenleenheden 9 en 36, welke gedeeltelijk in het bebouwd gebied liggen. Wat tevens uit Figuur 10 blijkt is dat de satelliet verdamping minder spreiding laten zien dan de FutureView waarden. Uit eerdere studies is dit eveneens gebleken (Van den Bersselaar et al., 2004) en een verklaring hiervoor is dat de NOAA satelliet is gebruikt die een resolutie heeft van 1 km, waardoor lokale afwijkingen worden uitgemiddeld.

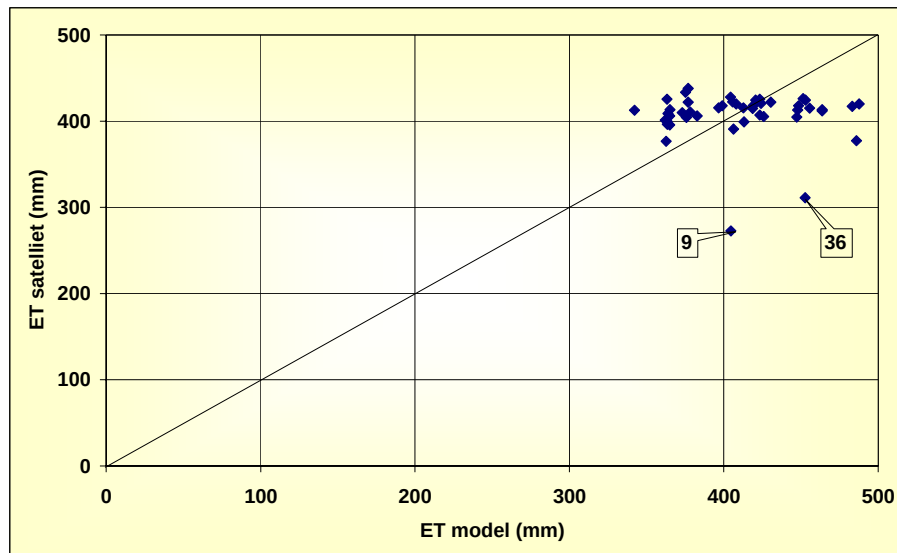
Concluderend kan echter worden vastgesteld dat de FutureView methode en de satelliet methode goed overeenkomen.

Tabel 5. Validatie van FutureView voor de referentiesituatie zomer 2003.

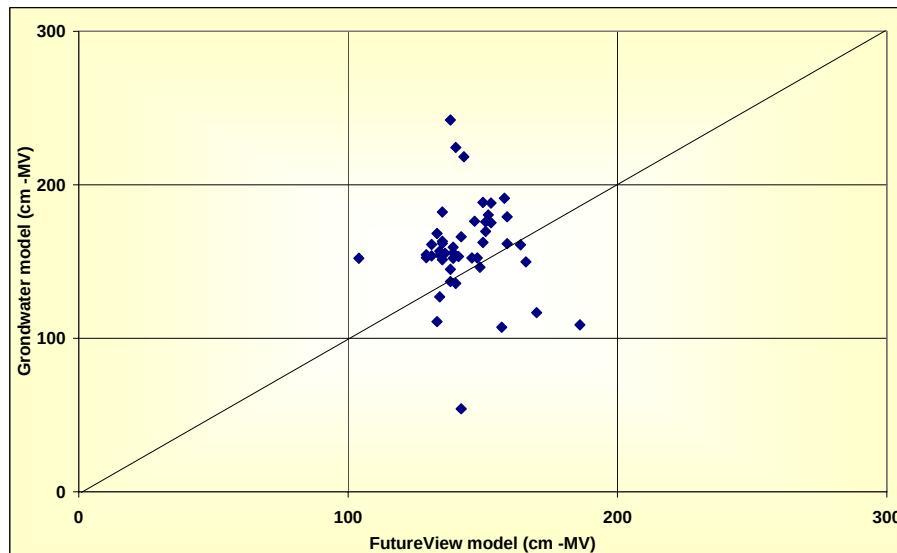
	Ter Apelersluis	Vennix	Westerwoldse Aa	Totaal
Verdamping (mm)				
FutureView	412	448	372	402
Satelliet	420	406	398	407
Grondwaterstand (cm –MV)				
FutureView	136	145	156	146
Grondwatermodel	167	153	156	159

5.3.2 Vergelijk met grondwaterstanden

FutureView berekend aan de hand van de volledige hydrologische processen ook grondwaterstanden. In een eerdere studie is een TRIWACO grondwatermodel gebruikt om grondwaterstanden te bepalen. Voor de FutureView methode is de gemiddelde grondwaterstand in 2003 vergeleken met de GLG van het grondwatermodel. Voor FutureView kan geen GLG worden bepaald, aangezien berekeningen voor een enkel jaar zijn gedaan. Gezien de droge situatie in 2003, zal de gemiddelde grondwaterstand in 2003 echter overeenkomen met de GLG. De resultaten van deze twee modellen komen goed overeen (Tabel 5).



Figuur 10. Vergelijking van de actuele verdamping bepaald met het model en met de satelliet voor de 46 rekeneenheden. De nummers geven de afwijkende rekeneenheden aan.



Figuur 11. Vergelijking van de berekende grondwaterstanden bepaald met het FutureView model en het grondwatermodel voor de 46 rekeneenheden.

De vergelijking per rekeneenheid is weergegeven in (Figuur 11). Het grondwatermodel laat meer variatie zien in GLG dan de gemiddelde 2003 grondwaterstand uit FutureView. Van drie meest afwijkende gebieden waar het grondwatermodel diepere GLGs zijn berekend (rekeneenheden 3, 25 en 37), liggen er twee in het noorden in het Westerwoldse aanvoergebied en is er een kleine rekeneenheid aan de grens met Duitsland.

In het algemeen kan geconcludeerd worden dat de vergelijking tussen de grondwaterstanden redelijk goed is, met een wat kleinere spreiding voor FutureView. Hierbij moet rekening gehouden worden dat voor het grondwatermodel de GLG gebruikt is en voor FutureView de gemiddelde grondwaterstand in de zomer van 2003.

5.3.3 Conclusie validatie

De vergelijking van de FutureView methode met de satelliet verdamping zeer goed overeenkomen en met het grondwatermodel de resultaten van FutureView redelijk goed overeenkomen. Binnen de doelstelling van deze studie is vooral de verdamping en het verdampingstekort van belang en kan dus worden geconcludeerd dat de FutureView methode geschikt is om de wateropgave droogte te bepalen.

5.4 Resultaten FutureView

Zoals eerder vermeld zijn er in totaal vijf verschillende FutureView simulaties uitgevoerd:

- Evaluatie 2003: werkelijke wateraanvoer
- Evaluatie 2003: geen wateraanvoer
- Evaluatie 2050: wateropgave droogte (droogteschade gelijk aan 2003)
- Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003
- Evaluatie 2050: verminderde wateraanvoer (helft van 2003)

Resultaten van deze vijf simulaties zijn te zien in Tabel 11 tot en met Tabel 15, waar zowel in mm als in m³ voor drie perioden aangegeven is hoeveel de infiltratie en droogte schade bedraagt en de bijbehorende geschatte opbrengst. Om de geschatte economische opbrengst in Euro's te bepalen is de gemiddelde opbrengst voor consumptieaardappelen (44 ton ha⁻¹) en tarwe (9,7 ton ha⁻¹) genomen en de gemiddelde prijs (€ 120 ton⁻¹ voor consumptieaardappelen en € 139 ton⁻¹ voor tarwe). Dit zijn globale waarden voor Nederland voor het jaar 2003 (Van der Meer, 2004).

Een aantal opmerkingen die van belang zijn bij de Tabel 11 tot en met Tabel 15:

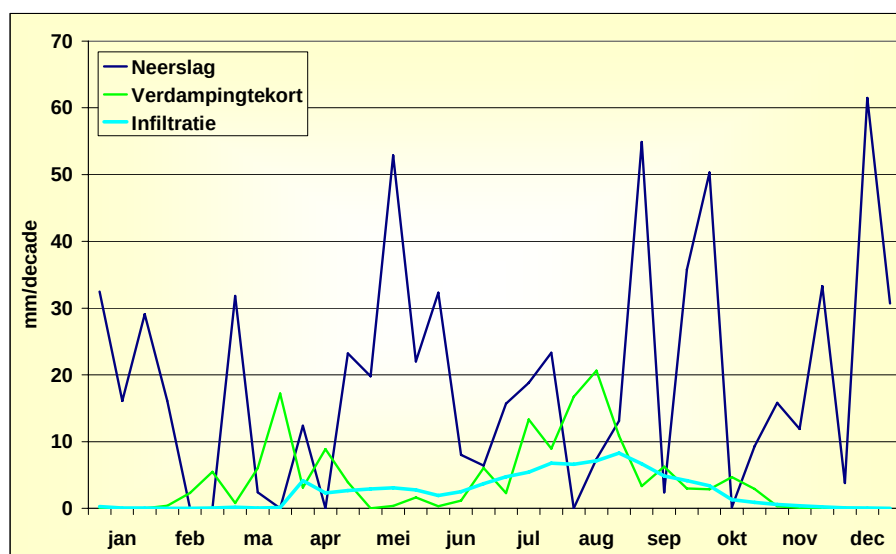
- Gewasopbrengst en schade zijn een totaal per jaar en zijn dus niet voor kortere perioden (zomer, jul-aug, of decade) weer te geven.
- Het verdampingstekort heeft betrekking op het totale verdampingstekort van bodem en gewas: het verschil tussen de actuele en de potentiële evapotranspiratie.
- Alle resultaten zijn weergegeven als gewogen gemiddelden met de grootte van de rekeneenheden als factor.
- Deze studie was niet specifiek opgezet voor een analyse van gewasopbrengsten en resultaten van de economische analyse moeten daarom indicatief worden beschouwd.

Gedetailleerde resultaten van alle FutureView simulaties zijn op de bijbehorende CDrom weergegeven waar per rekeneenheid de totale waterbalans per decade (10 dagen) beschikbaar is. In de volgende paragrafen zullen de belangrijkste resultaten in detail worden besproken.

5.5 Referentie 2003 en effect van wateraanvoer

Voor de referentiesituatie 2003 is SWAP gebruikt voor elke rekeneenheid: de FutureView methode. In Kaart 11 is de hoeveelheid infiltratie per rekeneenheid geplot. Duidelijk is dat er een grote ruimtelijke spreiding is met gebieden waar veel infiltratie plaatsvindt en gebieden waar nagenoeg geen infiltratie plaatsvindt. Belangrijk bij deze figuur is dat het hier dus niet om de wateraanvoer in het openwater gaat, maar dat de resultaten zuiver de echte infiltratie in de bodem laten zien. Hierdoor is het effect van de bodem, de drainage weerstand en de vochttoestand van de bodem integraal meegenomen.

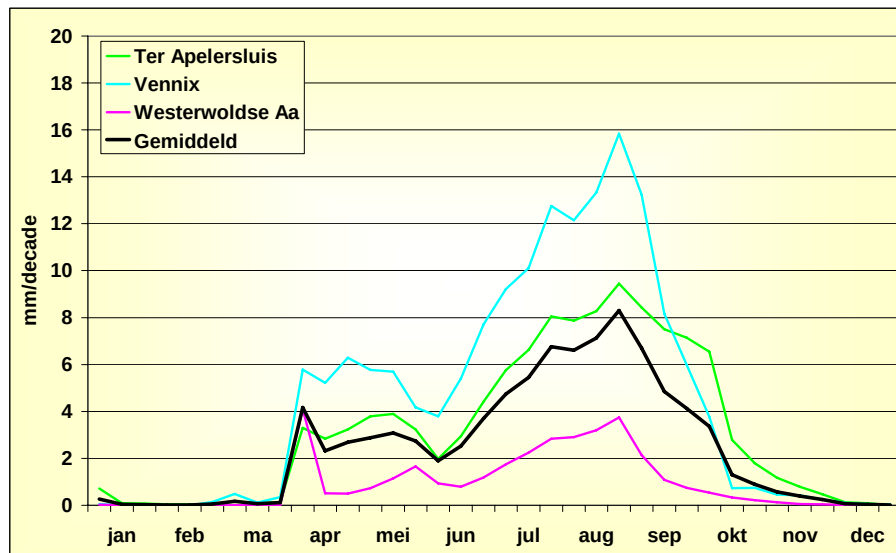
Voor het jaar 2003 is ook per wateraanvoergebied weergegeven hoeveel water is geïnfiltreerd (Tabel 11). Voor de drie wateraanvoergebieden bedraagt de totale infiltratie 37 miljoen m³, wat neerkomt op bijna 90 mm ha⁻¹. Duidelijk is ook dat de hoeveelheid water die geïnfiltreerd is in het Westerwoldse Aa aanvoergebied klein is. Dit komt voor een groot gedeelte door de zware zeekleigronden en de daarmee samenhangende drainage- en infiltratieweerstanden en slootafstanden.



Figuur 12. Belangrijkste termen van de waterbalans weergegeven per decade voor de referentiesituatie 2003.

Resultaten van de simulaties zijn ook per decade (drie perioden per maand: 1-10, 11-20 en 20-eind van de maand) beschikbaar en geëvalueerd. In Figuur 12 is de neerslag, het verdampingstekort en de infiltratie voor de drie wateraanvoergebieden gemiddeld weergegeven. Het kleine verdampingstekort dat zichtbaar is in maart heeft vooral te maken met het niet volledig bedekkend zijn van de vegetatie en de droge bodemgrond. Op het gewas zal dit dan ook weinig effect hebben. Interessanter is het verdampingstekort in juli en augustus en de daardoor optredende vermindering in gewasgroei. De

infiltratie is in deze periode dan ook het hoogst, maar nog steeds niet voldoende om het verdampingstekort volledig te reduceren. In Figuur 13 is per wateraanvoergebied uitgesplitst wat de infiltratie is geweest in 2003 per decade. De patronen van de drie gebieden is gelijk, maar duidelijk is wel dat Ter Apelersluis en vooral Vennix een hogere infiltratie hebben.



Figuur 13. Infiltratie weergegeven per decade voor de drie wateraanvoergebieden.

Tabel 6. Opbrengstreductie indien geen wateraanvoer in 2003 zou hebben plaatsgevonden. De waarden in € ha⁻¹ geeft slechts een globale indicatie weer.

	Opbrengstreductie (%)		Indicatief verschil € ha ⁻¹
	met aanvoer	zonder aanvoer	
Ter Apelersluis	17	22	136
Vennix	16	21	119
Westerwoldse Aa	24	25	43

Er is ook geanalyseerd wat het effect van deze wateraanvoer is op de vermindering van droogteschade. Met behulp van exact dezelfde modellen is hier een globale schatting van te maken door dezelfde modellen te gebruiken ervan uitgaande dat er geen wateraanvoer is. In deze studie is het SWAP model met de simpele gewasgroei module toegepast, zodat uitgegaan moet worden van alleen vochttekort als bepalende factor (zoals uitgelegd in paragraaf 5.1) en de vereenvoudigde economische analyse zoals weergegeven in paragraaf 5.4.

Voor de drie aanvoergebieden betekent dat het volledig stoppen van wateraanvoer een schadepost van ongeveer € 90 per hectare extra schade zal opbrengen door verminderde oogst (Tabel 6). Voor de drie wateraanvoergebieden liggen Ter Apelersluis en Vennix dicht bij elkaar (met ongeveer € 125 ha⁻¹), terwijl het Westerwoldse Aa gebied minder heeft te leiden aangezien de infiltratie daar toch al relatief laag is (Tabel 11). Omgerekend naar het totaal voor deze drie aanvoergebieden zou de totale schade als gevolg van verminderde oogst op ongeveer € 4,5 miljoen neer komen. Deze waarden zijn slechts een globale benadering, aangezien deze niet gewasspecifiek zijn en geen volledige economisch analyse is toegepast.

5.6 Wateropgave droogte 2050

5.6.1 Algemeen

Met behulp van de FutureView methode is bepaald hoeveel de wateropgave droogte voor het jaar 2050 bedraagt. Zoals eerder vermeld is de wateropgave droogte gedefinieerd als "de hoeveelheid water die **extra** aangevoerd moet worden in 2050 om voor de effecten van klimaatverandering te compenseren".

Om deze wateropgave droogte te bepalen wordt met FutureView exact dezelfde bepaling gedaan als de voor de referentiesituatie, waarbij alleen de neerslag en de verdamping wordt aangehouden volgens de klimaatscenario's van 2050.

5.6.2 Klimaatscenario's

Om deze wateropgave droogte te bepalen moet een schatting van de klimatologisch omstandigheden gemaakt worden voor het jaar 2050. Het is duidelijk dat er geen éénduidige schatting voor het klimaat in 2050 bestaat. De belangrijkste componenten van het klimaatsysteem (de atmosfeer, de oceanen, ijsmassa en biosfeer) vertonen niet-lineair gedrag. Kleine veranderingen kunnen grote gevolgen hebben. Voor het toekomstig klimaat is onbekend hoe snel het klimaat verandert en wat de precieze regionale gevolgen hiervan zijn (ICIS, 2002).

Het is echter wel duidelijk dat in de zomer sprake zal zijn van extremere droogte en in de winter kunnen meer extreem natte periodes worden verwacht. Het KNMI heeft schattingen gemaakt van toekomstige klimaatveranderingen in Nederland, die weer gebaseerd zijn op schattingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001). De hoogste en laagste schattingen van de toekomstige temperatuurstijging in 2050 liggen tussen de 0,5 - 2°C. De range voor neerslag in 2050 varieert tussen -10% en + 2% in de zomer en -10% en + 12% in de winter. De bandbreedte van verdamping varieert tussen 2 - 8% in het jaar 2050 (ICIS, 2002).

Tabel 7. Watertekorten nu en in de toekomst in bodem als gemiddelden voor heel Nederland. (Droogtestudie Nederland 2003)

	Tekort in de bodem (mm)		
	Huidig	2050 midden	2050 hoog
gemiddeld	21	25 (+19%)	28 (+36%)
extreem droog	143	153 (+8%)	165 (+17%)

De eindrapportage van Fase 1 van de Droogtestudie Nederland laat zien dat onder invloed van de klimaatveranderingen de tekorten in de bodem toenemen. In een gemiddeld jaar wordt in het middenscenario het tekort 19% groter en in het hoge scenario 36%. In een extreem droog jaar zal dat respectievelijk 8% en 17% zijn (Tabel 7).

In het NBW is afgesproken om voor de wateroverlast uit te gaan van het zogenaamde middenscenario, maar concrete afspraken voor de wateropgave droogte staan niet in het NBW. In deze studie gaan we daarom ook uit van het middenscenario (de centrale schatting) wat neerkomt op (WB21 Basisrapport):

- +3% neerslag per jaar
- +1% neerslag zomer
- +6% neerslag winter
- +10% neerslagintensiteit buien
- +8% zomerverdamping

Het is duidelijk dat niet simpelweg aan al deze voorwaarden kan worden voldaan, door bijvoorbeeld alle buien met 10% te verhogen of door alle neerslag met 3% te verhogen. Er zijn nog geen standaard methoden beschikbaar en daarom is hier gekozen voor een methode waarbij voldaan wordt aan de randvoorwaarden zoals gesteld in het WB21:

$$R_{cc} = R + R \cdot 10\% \cdot e^{\left[-a \left(1 - \frac{R}{R_{max}} \right) \right]}$$

met: R = dagelijkse neerslag (mm d^{-1})
 R_{cc} = neerslag onder klimaatverandering (mm d^{-1})
 R_{max} = maximale neerslag in een jaar (mm d^{-1})
 a = constante

Deze aanpak zorgt ervoor dat bij een juiste keuze van de factor a een nieuwe reeks kan worden gegenereerd die voldoet aan het middenscenario. Indien voor a een waarde van 0 wordt gekozen neemt alle neerslag met 10% toe. Hierdoor wordt dus de totale zomer- en winterneerslag ook 10% hoger, wat niet klopt met het WB21 scenario. Een grote waarde van a zorgt ervoor dat de extreme buien met 10% worden verhoogd en de andere buien met minder dan 10%. Voor het zomer- en het winterhalfjaar moeten verschillende waarden voor de factor a worden genomen. Na enig rekenwerk blijkt dat voor de zomer een factor van 40 moet worden gekozen, waardoor de extremen buien met 10% worden verhoogd en de minder extremen buien bijna niet toenemen. Voor de winter is een factor van 0,9 geschikt, wat resulteert in een toename van 10% voor de extreemste buien, maar de minder extremen buien ook nog behoorlijk toenemen.

Het effect van een verhoogde CO_2 concentratie op planten is een factor die nog vaak onderschat wordt, maar ook van belang is. De Droogtestudie Nederland heeft enkele belangrijke conclusies getrokken (KIWA, 2004):

- Doordat bij CO_2 -toename de weerstand van de huidmondjes voor verdamping toeneemt, neemt de transpiratie door planten af.
- De biomassaproductie van nagenoeg alle planten zal toenemen.
- Planten verdampen bij een hoge temperatuur meer om af te koelen, en niet zozeer om CO_2 op te nemen.

Er wordt echter ook geconcludeerd dat er nog veel onzekerheid is en dat terugkoppelingsmechanisme nog niet volledig begrepen worden. In deze studie wordt daarom het directe CO_2 effect op planten niet meegenomen.

Het is nog volstrekt onduidelijk wat de invloed van klimaatverandering zal zijn op kwel en wegzijging. Zeespiegelstijging is een vaststaand feit waardoor kwel lang de kust zeker zal toenemen (IPCC, 2001). Aan de andere kant zal de verdamping hoger worden, waardoor grondwaterstanden zullen dalen en de kwel zal verminderen (of wegzijging vergroten). Hiertegenover stelt het KIWA (2004) dat de invloed van CO_2 op huidmondjes ervoor zorgt dat de "water use efficiency" zal toenemen, waardoor er minder water zal worden opgenomen, waardoor de grondwaterstand zal stijgen en kwel dus weer zal

toenemen. Hierbij wordt wel opgemerkt dat deze conclusies "... speculatief en bevat verschillende aannamen die aanvechtbaar zijn". Gezien deze onzekerheden gaan we er in deze studie vanuit dat kwel en wegzijging in 2050 niet zal veranderen.

5.6.3 Wateropgave droogte 2050

De gewasopbrengst zoals bepaald voor de referentiesituatie 2003 vormt de basis voor de wateropgave droogte 2050, aangezien ervan is uitgegaan dat de wateropgave droogte de hoeveelheid water is die **extra** moet worden aangevoerd. FutureView is iteratief toegepast met verschillende hoeveelheden wateraanvoer totdat de gewasopbrengst in 2050 gelijk is aan die van 2003. Uit de resultaten blijkt dat de wateropgave droogte voor de drie wateraanvoergebieden gezamenlijk ruim 15 miljoen m³ per jaar bedraagt, wat neerkomt op gemiddeld 36 mm (Tabel 8).

Tabel 8. Wateropgave droogte 2050 zoals bepaald met FutureView.

	Wateropgave droogte	
	mm	m ³
Ter Apelersluis	43	6.600.000
Vennix	41	3.600.000
Westerwoldse Aa	29	5.200.000
Totaal	36	15.400.000

Deze 15 miljoen m³ is dus de hoeveelheid water die extra zou moeten worden aangevoerd in 2050, in vergelijking met 2003. In Tabel 11 is weergegeven dat de aanvoer in 2003 ongeveer 34 miljoen m³, zodat de totale aanvoer ongeveer 50 miljoen m³ zou moeten bedragen.

De wateropgave droogte is per wateraanvoergebied te zien in Tabel 8 en per rekeneenheid in Kaart 12. Opvallende is dat de wateropgave droogte per wateraanvoergebied niet veel verschilt en globaal ligt tussen de 30 en de 40 mm (Tabel 8). Ook indien meer in detail wordt gekeken naar de afzonderlijke rekeneenheden blijkt de wateropgave droogte gemiddeld tussen de 20 en 50 mm te liggen. Deze relatief kleine ruimtelijke verschillen zijn te verklaren doordat het bij de wateropgave droogte gaat om de hoeveelheid water die **extra** moet worden aangevoerd om de negatieve effecten van klimaatverandering teniet te doen. Aangezien de klimaatverandering gelijk over het gehele gebied is verondersteld, zal er dus een kleine ruimtelijke spreiding zijn te verwachten.

In vergelijking met de 2003 aanvoer is de wateropgave droogte voor Ter Apelersluis en Vennix veel kleiner (43% en 27%) dan voor Westerwoldse Aa (89%). Dit is het gevolg van de moeilijkheid om water te infiltreren in het Westerwoldse Aa gebied door vooral de zwaardere gronden. Uiteraard hangt dit ook samen met de definitie van de wateropgave droogte: dezelfde gewasopbrengst in 2050 als in 2003.

5.7 Effect constante wateraanvoer

In de voorgaande paragraaf is bepaald hoeveel extra water moet worden aangevoerd om voor de negatieve gevolgen van klimaatverandering te compenseren. Er blijkt hier dus ruim 15 miljoen m³ voor nodig te zijn. Interessant is ook om te zien wat het effect zou zijn als deze 15 miljoen m³ niet extra beschikbaar zou zijn, maar indien de dezelfde hoeveelheid als in 2003 beschikbaar zou blijven. Deze hoeveelheid is 34 miljoen m³ (Tabel 11, zomer). Aangezien FutureView de hoeveelheid infiltratie berekend op grond van drainageweerstanden, slootpeilen, verdampingstekort, kwel etc., is iteratief de drainageweerstand aangepast totdat de infiltratie in 2050 per deelgebied gelijk was aan die in 2003.

De uitgebreide resultaten zijn weergegeven in Tabel 14 en in Tabel 9 is de consequentie te zien van het niet vermeederen van de wateraanvoer om te compenseren voor de effecten van klimaatverandering. Het blijkt dat hierdoor een klein € 100 ha⁻¹ opbrengstderving te verwachten valt.

Tabel 9. Opbrengstreductie voor 2003 (Tabel 11) en 2050 (Tabel 14) bij gelijke infiltratie. De waarden in € ha⁻¹ geven slechts een globale indicatie weer.

	Opbrengstreductie (%)		Indicatief verschil € ha ⁻¹
	2003	2050	
Ter Apelersluis	17	20	90
Vennix	16	19	95
Westerwoldse Aa	24	26	70

5.8 Effect halvering wateraanvoer

De mogelijkheid bestaat dat de hoeveelheid water die beschikbaar is voor wateraanvoer in de toekomst lager zou zijn als gevolg van de ontwikkelingen met betrekking tot het IJsselmeer. Als gevolg van klimaatverandering kan er een wijziging optreden in de aanvoer naar het IJsselmeer, en kan als gevolg van zeespiegelstijging het ook noodzakelijk blijken om het peilbeheer aan te passen. Alhoewel de huidige uitgangspositie is om de wateraanvoer niet te veranderen, is een evaluatie van een eventuele vermindering toch gewenst.

Er is met behulp van FutureView geanalyseerd wat de extra schade aan landbouw zou zijn indien de hoeveelheid geïnfilterd water in 2050 de helft zou zijn van de infiltratie in 2003. Met andere woorden: in 2003 is 37 miljoen m³ aangevoerd voor infiltratie in de aanvoergebieden Ter Apelersluis (17 miljoen m³), Vennix (14 miljoen m³) en Westerwoldse Aa (6 miljoen m³); wat zou het effect zijn indien deze waarden gehalveerd zouden zijn in 2050.

Uit Tabel 10 blijkt dat de opbrengstreductie met enkele procenten zal toenemen wat weer globaal vertaald is naar de **extra** schade in € per hectare. Voor Ter Apelersluis en Vennix blijkt deze extra schade ruim € 100 ha⁻¹ te bedragen en voor het Westerwoldse Aa gebied € 30 ha⁻¹. Deze lagere schade voor het Westerwoldse Aa wateraanvoergebied heeft weer te maken met de reeds lagere wateraanvoer, waardoor een halvering hiervan een kleiner effect zal hebben.

Tabel 10. Opbrengstreductie voor 2050 bij gelijke infiltratie als 2003 en bij halve infiltratie. De waarden in € ha⁻¹ geven slechts een globale indicatie weer.

	Opbrengstreductie (%)		Indicatief verschil € ha ⁻¹
	aanvoer 2003	aanvoer half 2003	
Ter Apelersluis	20	24	135
Vennix	19	22	108
Westerwoldse Aa	26	27	31

Tabel 11. Resultaten FutureView voor de situatie 2003 normale wateraanvoer.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Ter Apelersluis	693	480	142	114	17	2696
Vennix	693	516	106	158	16	2985
Westerwoldse Aa	693	439	187	34	24	2318
Totaal	693	469	154	88	19	2592
Zomer						
Ter Apelersluis	348	412	99	99		
Vennix	348	448	63	151		
Westerwoldse Aa	348	372	144	32		
Totaal	348	402	111	81		
juli-aug						
Ter Apelersluis	78	132	70	46		
Vennix	78	165	37	73		
Westerwoldse Aa	78	111	93	17		
Totaal	78	130	73	39		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Ter Apelersluis	106,000,000	73,000,000	22,000,000	17,000,000	17	41,000,000
Vennix	61,000,000	45,000,000	9,000,000	14,000,000	16	26,000,000
Westerwoldse Aa	127,000,000	81,000,000	34,000,000	6,000,000	24	43,000,000
Totaal	294,000,000	199,000,000	65,000,000	37,000,000	19	110,000,000
Zomer						
Ter Apelersluis	53,000,000	63,000,000	15,000,000	15,000,000		
Vennix	31,000,000	39,000,000	6,000,000	13,000,000		
Westerwoldse Aa	64,000,000	68,000,000	26,000,000	6,000,000		
Totaal	148,000,000	170,000,000	47,000,000	34,000,000		
juli-aug						
Ter Apelersluis	12,000,000	20,000,000	11,000,000	7,000,000		
Vennix	7,000,000	15,000,000	3,000,000	6,000,000		
Westerwoldse Aa	14,000,000	20,000,000	17,000,000	3,000,000		
Totaal	33,000,000	55,000,000	31,000,000	17,000,000		

Tabel 12. Resultaten FutureView voor de situatie 2003 geen wateraanvoer.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Ter Apelersluis	693	463	159	0	22	2560
Vennix	693	501	121	0	21	2866
Westerwoldse Aa	693	435	190	0	25	2275
Totaal	693	459	165	0	23	2500
Zomer						
Ter Apelersluis	348	395	116	0		
Vennix	348	434	78	0		
Westerwoldse Aa	348	368	147	0		
Totaal	348	391	122	0		
juli-aug						
Ter Apelersluis	78	119	84	0		
Vennix	78	154	48	0		
Westerwoldse Aa	78	109	96	0		
Totaal	78	122	81	0		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Ter Apelersluis	106,000,000	70,000,000	24,000,000	0	22	39,000,000
Vennix	61,000,000	44,000,000	11,000,000	0	21	25,000,000
Westerwoldse Aa	127,000,000	80,000,000	35,000,000	0	25	42,000,000
Totaal	294,000,000	194,000,000	70,000,000	0	23	106,000,000
Zomer						
Ter Apelersluis	53,000,000	60,000,000	18,000,000	0		
Vennix	31,000,000	38,000,000	7,000,000	0		
Westerwoldse Aa	64,000,000	68,000,000	27,000,000	0		
Totaal	148,000,000	166,000,000	52,000,000	0		
juli-aug						
Ter Apelersluis	12,000,000	18,000,000	13,000,000	0		
Vennix	7,000,000	14,000,000	4,000,000	0		
Westerwoldse Aa	14,000,000	20,000,000	18,000,000	0		
Totaal	33,000,000	52,000,000	35,000,000	0		

Tabel 13. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met gelijke droogte schade als 2003.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Ter Apelersluis	716	518	157	151	17	2720
Vennix	716	556	118	196	16	2997
Westerwoldse Aa	716	462	217	61	24	2255
Totaal	716	501	175	122	19	2576
Zomer						
Ter Apelersluis	352	449	106	142		
Vennix	352	488	68	192		
Westerwoldse Aa	352	394	166	61		
Totaal	352	433	124	117		
juli-aug						
Ter Apelersluis	78	147	73	64		
Vennix	78	182	38	91		
Westerwoldse Aa	78	116	105	29		
Totaal	78	141	79	54		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Ter Apelersluis	109,000,000	79,000,000	24,000,000	23,000,000	17	41,000,000
Vennix	63,000,000	49,000,000	10,000,000	17,000,000	16	26,000,000
Westerwoldse Aa	131,000,000	85,000,000	40,000,000	11,000,000	24	41,000,000
Totaal	303,000,000	213,000,000	74,000,000	52,000,000	19	109,000,000
Zomer						
Ter Apelersluis	54,000,000	68,000,000	16,000,000	22,000,000		
Vennix	31,000,000	43,000,000	6,000,000	17,000,000		
Westerwoldse Aa	65,000,000	72,000,000	31,000,000	11,000,000		
Totaal	149,000,000	184,000,000	53,000,000	50,000,000		
juli-aug						
Ter Apelersluis	12,000,000	22,000,000	11,000,000	10,000,000		
Vennix	7,000,000	16,000,000	3,000,000	8,000,000		
Westerwoldse Aa	14,000,000	21,000,000	19,000,000	5,000,000		
Totaal	33,000,000	60,000,000	34,000,000	23,000,000		

Tabel 14. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met gelijke infiltratie als 2003.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Ter Apelsluis	716	503	171	116	20	2624
Vennix	716	547	127	160	19	2928
Westerwoldse Aa	716	455	223	35	26	2203
Totaal	716	491	184	90	22	2505
Zomer						
Ter Apelsluis	352	435	121	102		
Vennix	352	479	77	147		
Westerwoldse Aa	352	387	173	34		
Totaal	352	423	134	82		
juli-aug						
Ter Apelsluis	78	135	84	45		
Vennix	78	175	45	67		
Westerwoldse Aa	78	111	110	16		
Totaal	78	133	87	37		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Ter Apelsluis	109,000,000	77,000,000	26,000,000	18,000,000	20	40,000,000
Vennix	63,000,000	48,000,000	11,000,000	14,000,000	19	26,000,000
Westerwoldse Aa	131,000,000	84,000,000	41,000,000	6,000,000	26	40,000,000
Totaal	303,000,000	208,000,000	78,000,000	38,000,000	22	106,000,000
Zomer						
Ter Apelsluis	54,000,000	66,000,000	18,000,000	16,000,000		
Vennix	31,000,000	42,000,000	7,000,000	13,000,000		
Westerwoldse Aa	65,000,000	71,000,000	32,000,000	6,000,000		
Totaal	149,000,000	179,000,000	57,000,000	35,000,000		
juli-aug						
Ter Apelsluis	12,000,000	21,000,000	13,000,000	7,000,000		
Vennix	7,000,000	15,000,000	4,000,000	6,000,000		
Westerwoldse Aa	14,000,000	20,000,000	20,000,000	3,000,000		
Totaal	33,000,000	56,000,000	37,000,000	16,000,000		

Tabel 15. Resultaten FutureView voor de situatie 2050 met infiltratie de helft van 2003.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Ter Apelersluis	716	487	187	56	24	2499
Vennix	716	535	139	80	22	2854
Westerwoldse Aa	716	452	226	18	27	2169
Totaal	716	482	194	45	24	2429
Zomer						
Ter Apelersluis	352	419	137	42		
Vennix	352	467	89	61		
Westerwoldse Aa	352	384	176	18		
Totaal	352	414	144	35		
juli-aug						
Ter Apelersluis	78	123	97	18		
Vennix	78	166	54	27		
Westerwoldse Aa	78	109	112	8		
Totaal	78	126	95	16		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Ter Apelersluis	109,000,000	74,000,000	29,000,000	8,000,000	24	38,000,000
Vennix	63,000,000	47,000,000	12,000,000	7,000,000	22	25,000,000
Westerwoldse Aa	131,000,000	83,000,000	42,000,000	3,000,000	27	40,000,000
Totaal	303,000,000	204,000,000	82,000,000	19,000,000	24	103,000,000
Zomer						
Ter Apelersluis	54,000,000	64,000,000	21,000,000	6,000,000		
Vennix	31,000,000	41,000,000	8,000,000	5,000,000		
Westerwoldse Aa	65,000,000	71,000,000	32,000,000	3,000,000		
Totaal	149,000,000	175,000,000	61,000,000	15,000,000		
juli-aug						
Ter Apelersluis	12,000,000	19,000,000	15,000,000	3,000,000		
Vennix	7,000,000	15,000,000	5,000,000	2,000,000		
Westerwoldse Aa	14,000,000	20,000,000	21,000,000	1,000,000		
Totaal	33,000,000	53,000,000	40,000,000	7,000,000		

6 Conclusies

6.1 Vergelijking verschillende methoden

Deze studie naar de regionale analyse van droogte is gebaseerd op een drietal methoden: SEBAL remote sensing, waterbalansen uit debietmetingen en FutureView. In Tabel 16 is een samenvatting van de resultaten van de verschillende methoden weergegeven, waaruit blijkt dat alleen FutureView in staat is om het verleden te analyseren en uitspraken te doen over de toekomst.

Uit de studie is naar voren gekomen dat het gebruik van debietmetingen voor het bepalen van de waterbalans niet direct mogelijk is. De complexiteit van het gebied, kunstwerken die zowel voor aanvoer als afvoer worden ingezet, tijdsafhankelijke oppervlakten per kunstwerk en een aantal kleinere niet-bemeten kunstwerken zorgen ervoor dat het opstellen van waterbalansen gepaard gaat met een grote onzekerheidsmarge. Uiteindelijk is voor twee wateraanvoergebieden voor een zuivere wateraanvoerperiode wel een redelijk betrouwbare waterbalans op te stellen.

De vergelijking van FutureView met de remote sensing komt goed overeen. De vergelijking tussen de gesimuleerde grondwaterstanden uit FutureView en een grondwatermodel uit een eerdere studie laat enige spreiding zien, maar liggen in dezelfde orde van grootte en laten dezelfde trend zien.

Tabel 16. Vergelijking van de drie gebruikte methoden. Alle waarden in mm.

	SEBAL	Waterbalansen	FutureView
Verdamping zomer 2003			
Ter Apelersluis	420	N/A	412
Vennix	406	N/A	448
Westerwoldse Aa	398	N/A	372
Totaal	407	N/A	402
Wateraanvoer zomer 2003			
Ter Apelersluis	N/A	35	99
Vennix	N/A	38	151
Westerwoldse Aa	N/A	0	32
Totaal	N/A	24	81
Wateropgave 2050			
Ter Apelersluis	N/A	N/A	43
Vennix	N/A	N/A	41
Westerwoldse Aa	N/A	N/A	29
Totaal	N/A	N/A	36

N/A is niet te bepalen met deze methode

6.2 Analyse huidige situatie

De situatie in 2003 is als referentie gebruikt en met behulp van de analyse met FutureView blijkt dat de gemiddelde infiltratie voor de drie wateraanvoergebieden ongeveer 90 mm bedroeg, wat overeenkomt met 37 miljoen m³. Wel is er een aanzienlijk verschil per wateraanvoergebied met de hoogste infiltratie voor Vennix gevold door Ter Apelersluis en een lage infiltratie voor het Westerwoldse Aa aanvoergebied (Tabel 11).

Er is ook gekeken wat het effect zou zijn van het stoppen van wateraanvoer op de landbouwproductie en de economische schade die hieruit voortvloeit. Uit de analyses blijkt dat stoppen met wateraanvoer waardoor er geen infiltratie kan plaatsvinden een schade van ongeveer € 90 per ha veroorzaakt. Omgerekend naar het totaal van de drie wateraanvoergebieden betekent dit een schade van ongeveer € 3 miljoen. Hierbij moet wel in ogenschouw genomen worden dat deze studie gericht was op het bepalen van de wateropgave droogte en dat de economische analyse van deze landbouwschade globaal is uitgevoerd.

6.3 Analyse toekomst

Met behulp van FutureView is gekeken naar de wateropgave droogte, die gedefinieerd is als "de hoeveelheid water die **extra** aangevoerd moet worden in 2050 om voor de effecten van klimaatverandering te compenseren". Het blijkt dat deze wateropgave droogte ongeveer 15 miljoen m³ bedraagt voor de drie wateraanvoergebieden. Een ruimtelijke spreiding van deze wateropgave is te zien in Kaart 12. Deze wateropgave droogte van 15 miljoen m³ is aanzienlijk hoger dan de 6 miljoen m³ genoemd in de stroomgebiedsvisie als eerste schatting.

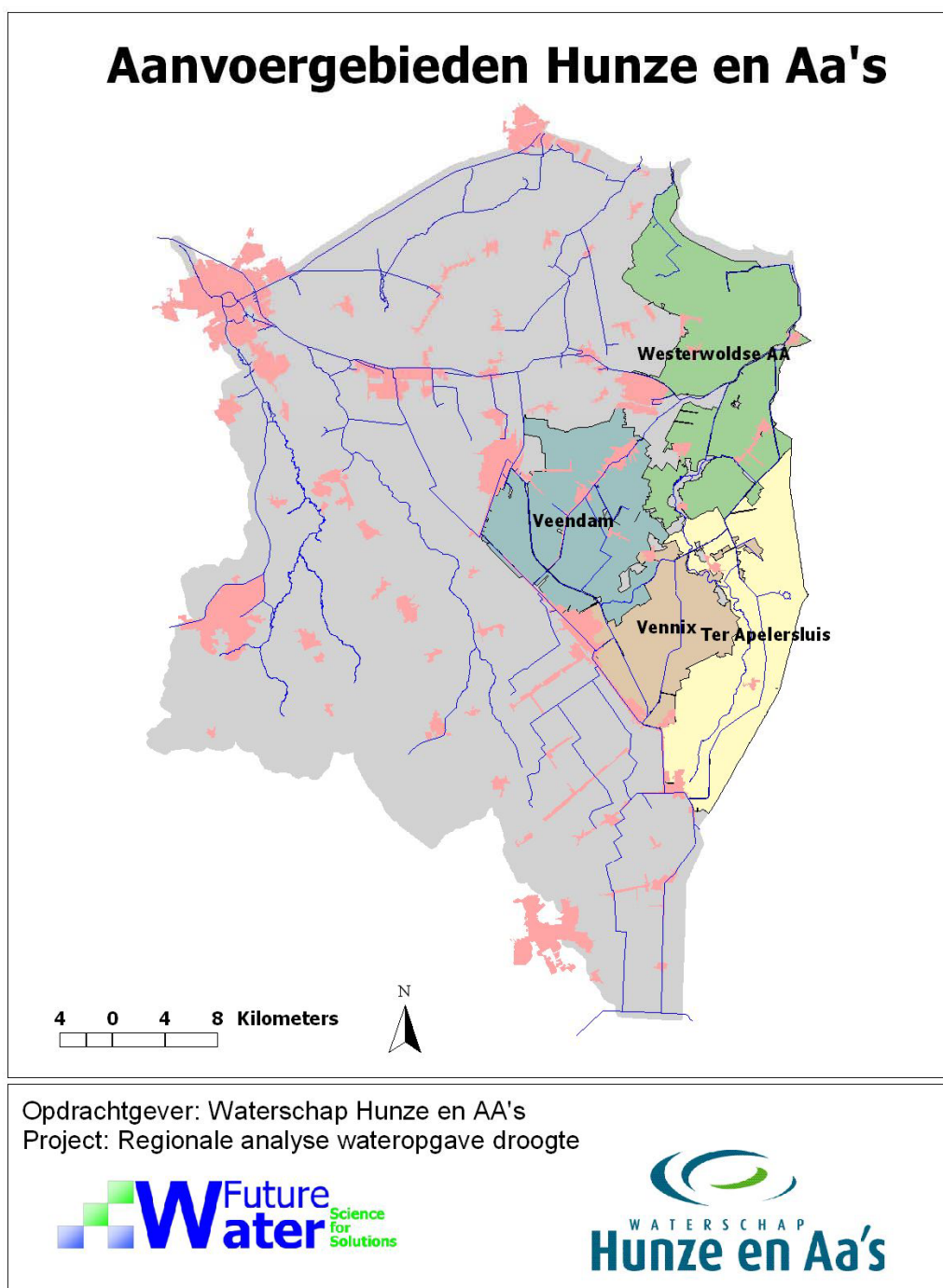
Vervolgens is er ook gekeken wat de gevolgen zouden zijn voor de landbouw indien deze 15 miljoen m³ niet beschikbaar is. Indien er dezelfde hoeveelheid water beschikbaar zou zijn als in 2003 zou de totale schade ongeveer € 4 miljoen bedragen. Als de aanvoer in 2050 echter maar de helft zou zijn van het water dat in 2003 beschikbaar was, loopt de schade op tot ongeveer € 7 miljoen wat overeenkomt met ruim € 150 per hectare is.

7

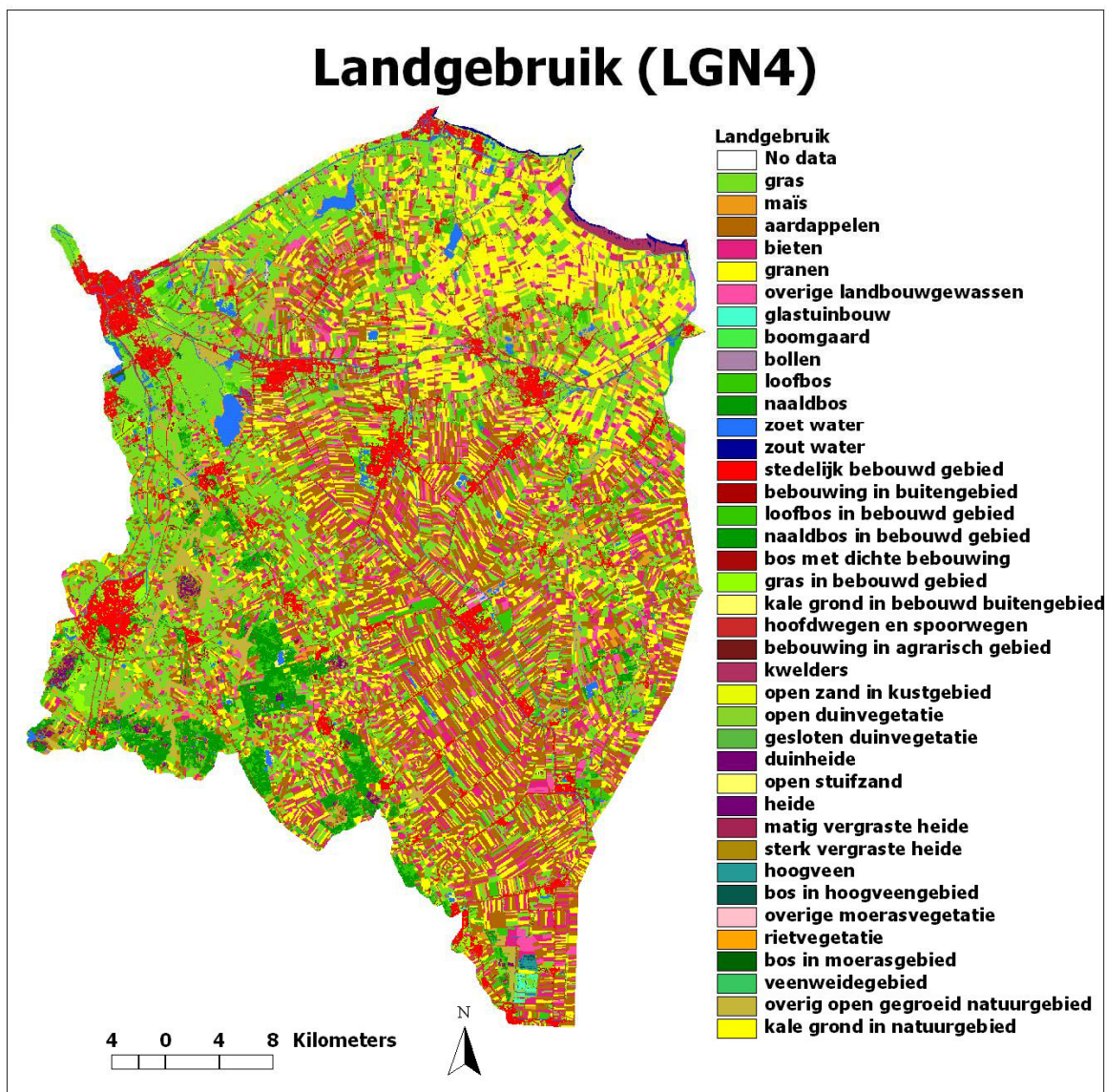
Referenties

- Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman en G. Hiemstra. 2003. Remote sensing ondersteund waterbeheer. STOWA rapport 2003-10.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome, FAO.
- Droogers, P. en W.G.M. Bastiaanssen. 2002. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 128: 11-18.
- Droogtestudie Nederland. 2003. Eindrapport fase 1.
- Droogtestudie Nederland. 2004. Samenvatting fase 2A.
- Feddes R.A., P.J. Kowalik, H. Zarandy. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-report 773.
- Hendriks, P. 2003. Visie peilbeheer. Interne notitie Waterschap Hunze en Aa's.
- ICIS, 2002. Scenario's voor de droogtestudie Nederland. Memo International Centre for Integrative Studies.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- Johannes, M. 2004. Een onderzoek naar en toepassing van correcte debietformules voor 38 kunstwerken van Waterschap Hunze en Aa's. Wageningen Universiteit MSc verslag.
- KIWA. 2004. Invloed van CO₂ -toename op verdamping en groei van planten. Een literatuuronderzoek voor de Droogtestudie Nederland.
- Kors, A.G., F.A.M. Claessen, J.W. Wesseling, en G.P. Können. 2000. Scenario's externe krachten voor WB21, RIZA/WL als KNMI publicatie.
- Van den Bersselaar, D., M. Jaarsma, P. Droogers, en R. Loeve. 2004. Regionale analyse van mogelijkheden tot vasthouden van water in het beheersgebied van Waterschap Zuiderzeeland. Rapport FutureWater en Waterschap Zuiderzeeland.
- Van der Meer, R. 2004. Agri-Monitor: Forse daling inkomens op akkerbouwbedrijven. LEI rapport.
- Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groor en J. Stoke. 2001. Warerretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153.

Kaarten



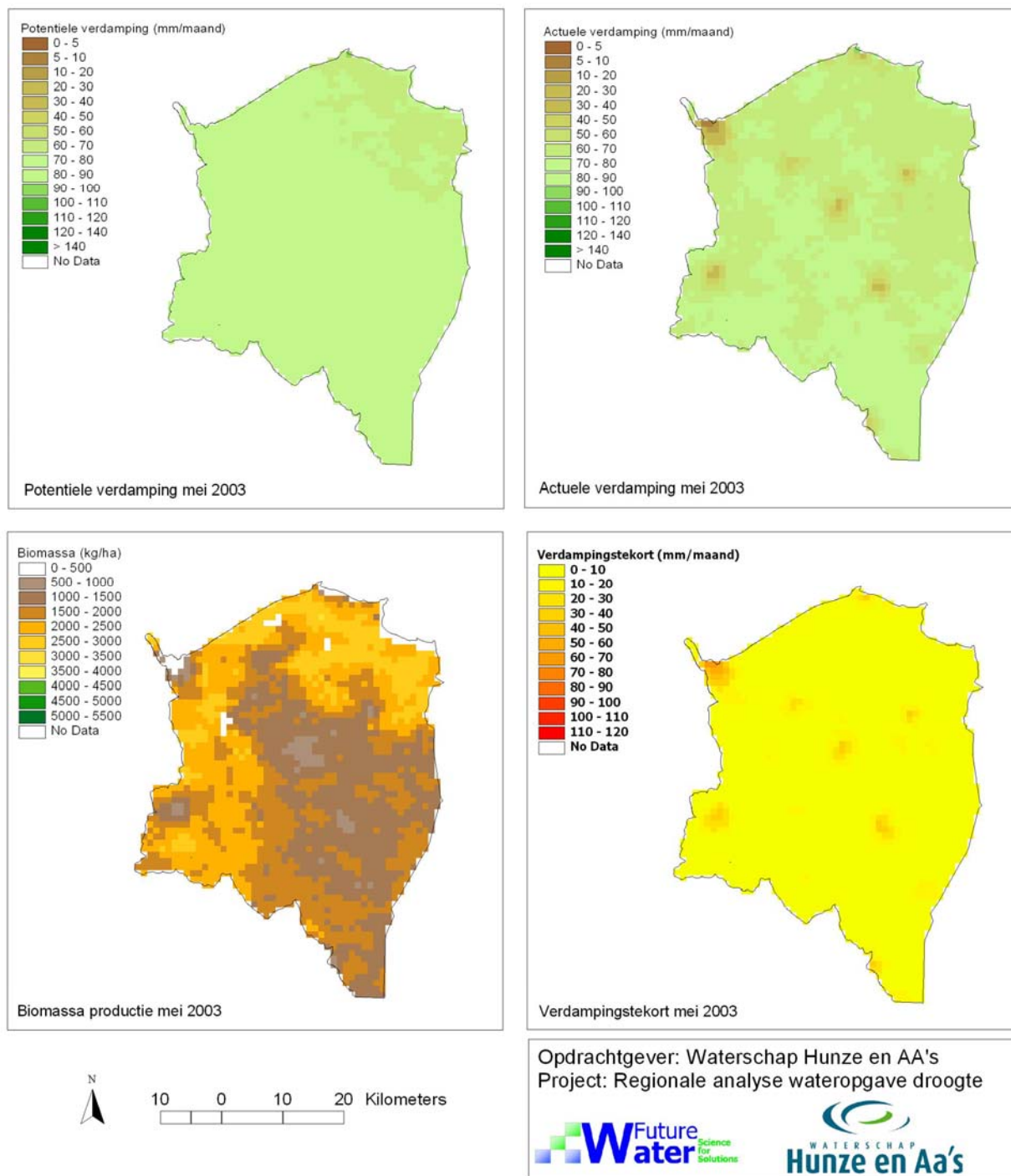
Kaart 1. Overzicht van de vier wateraanvoergebieden bij het Waterschap Hunze en Aa's.



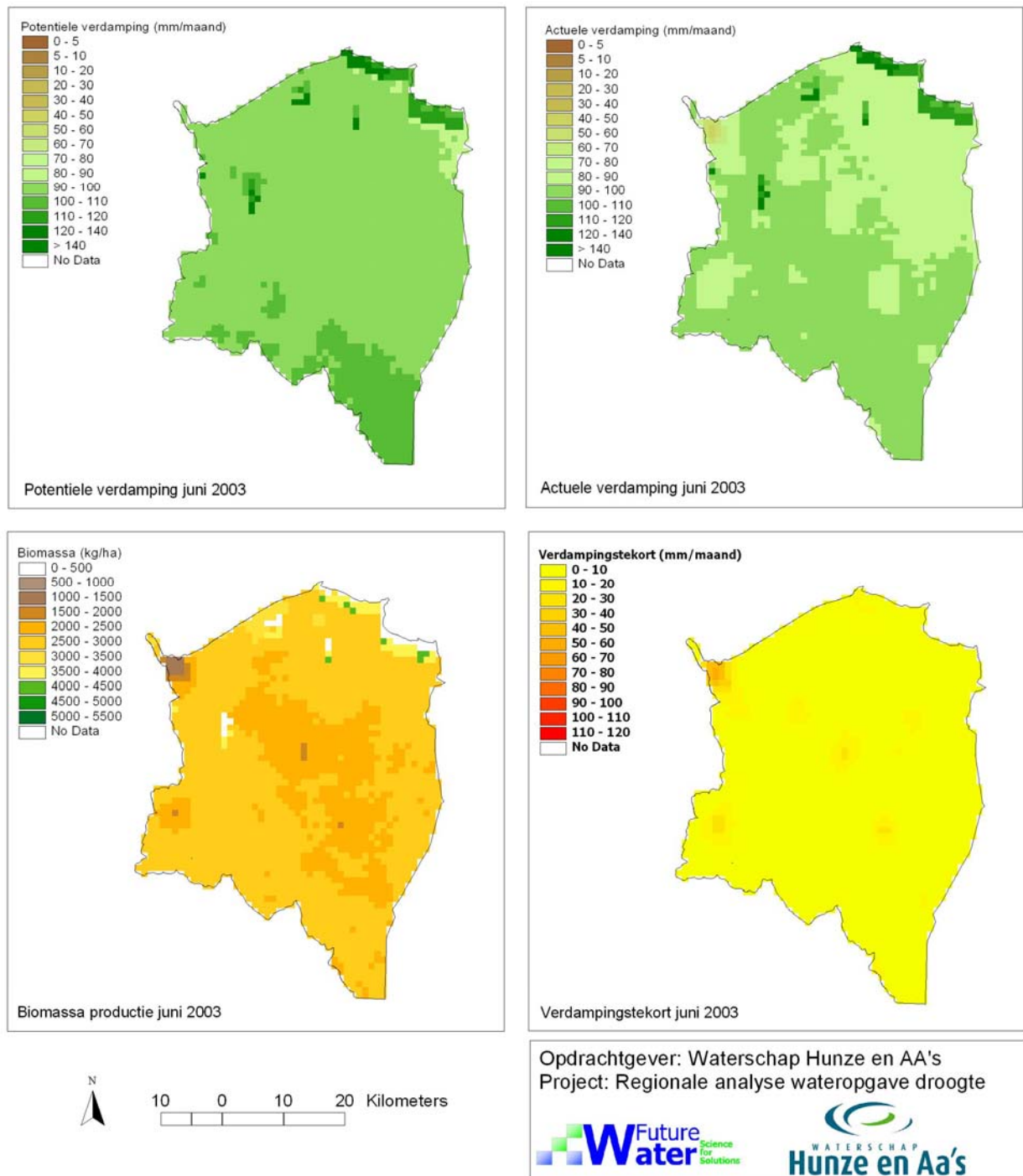
Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Project: Regionale analyse wateropgave droogte



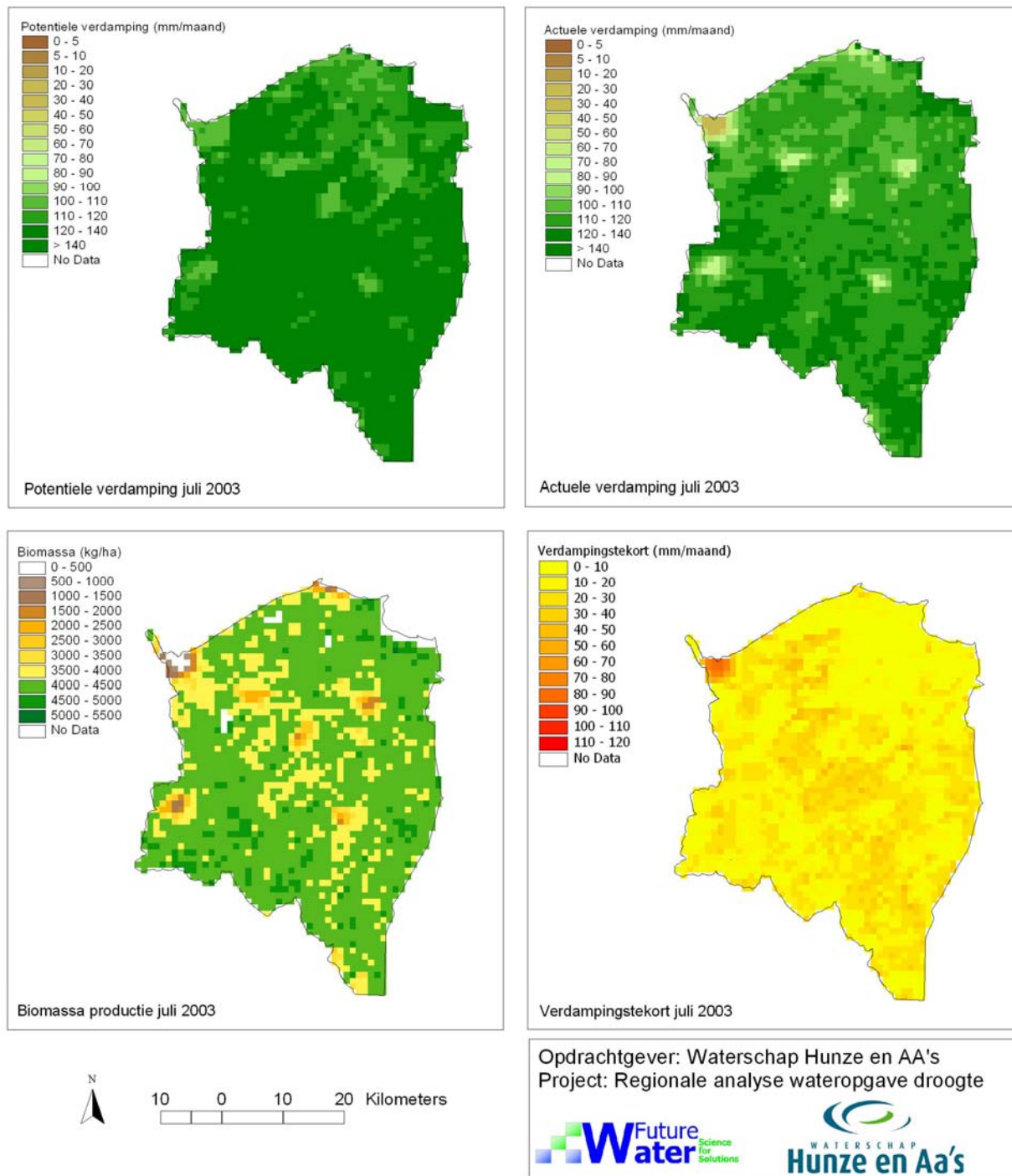
Kaart 2. Landgebruik afkomstig uit de Landelijke Grondgebruikskaat Nederland (LGN4)



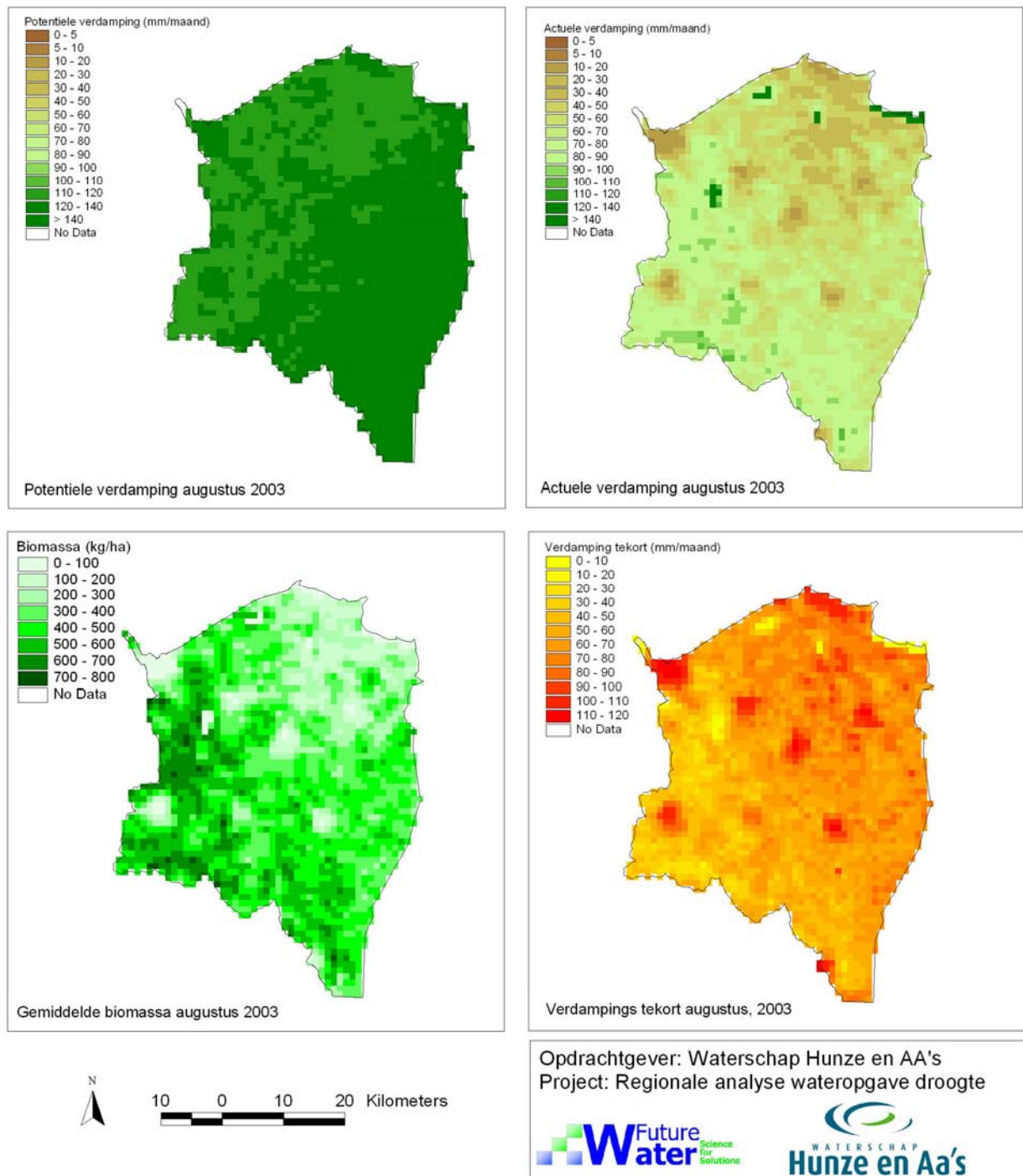
Kaart 3. Verdamping en gewasgroei in mei 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale groene stof.



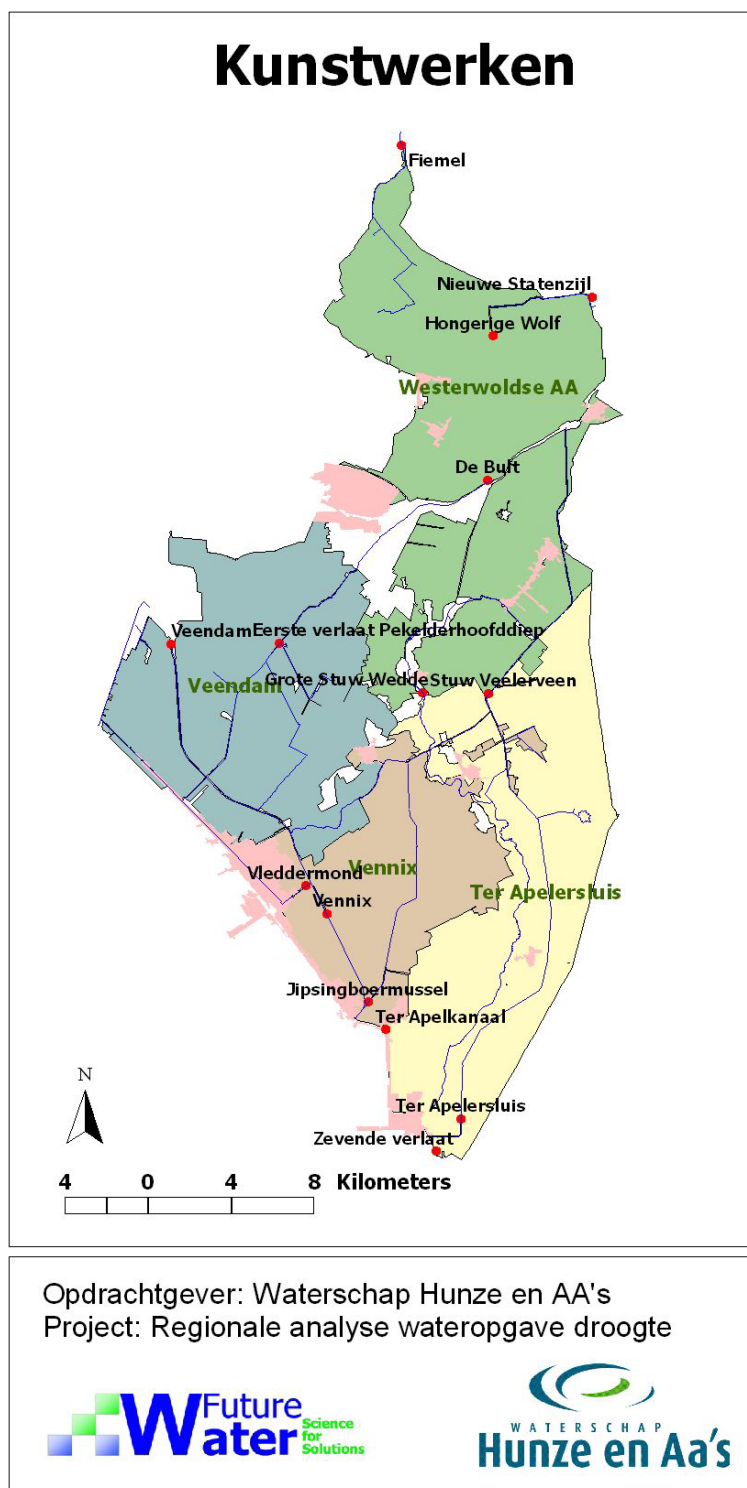
Kaart 4. Verdamping en gewasgroei in juni 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale groene stof.



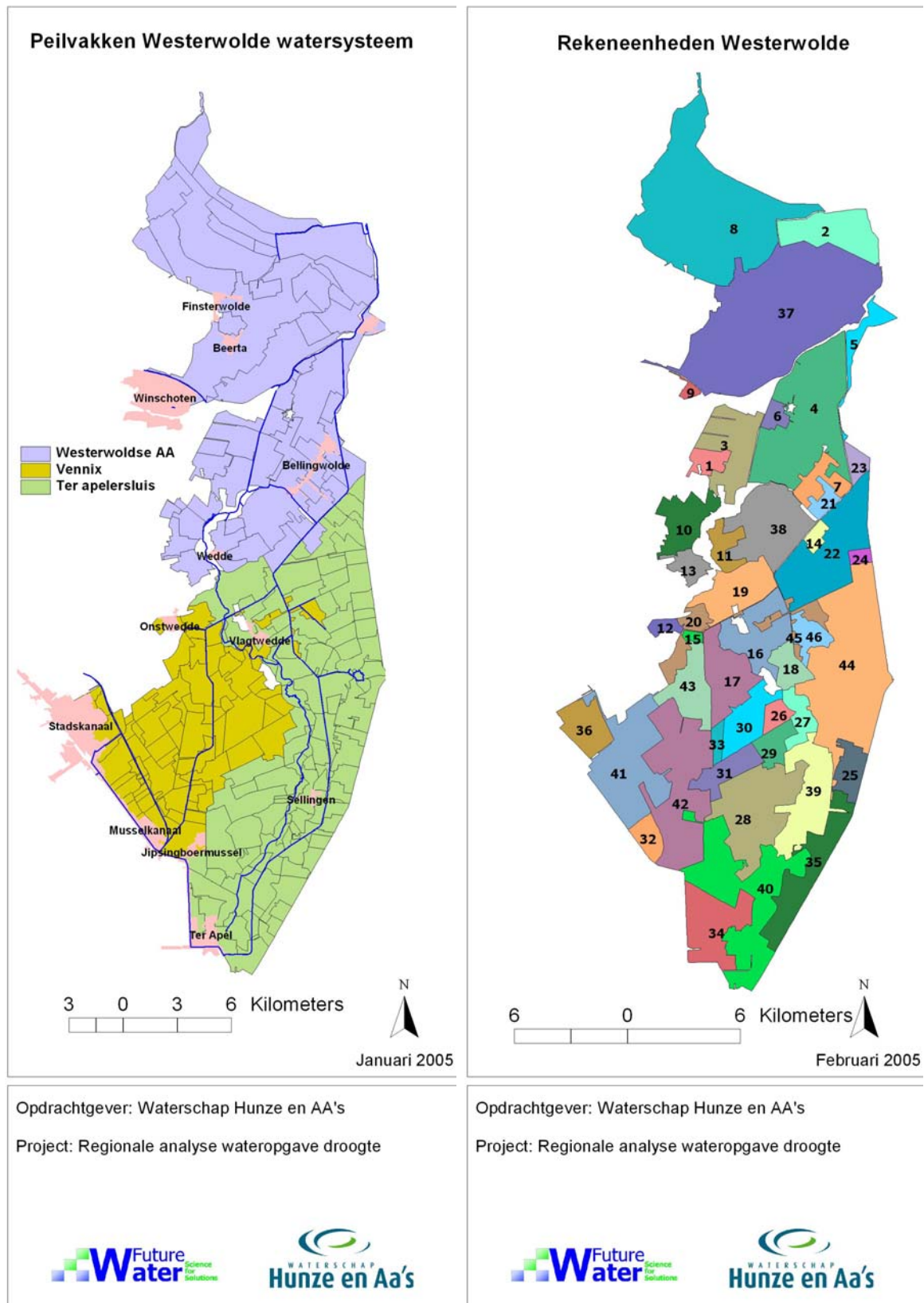
Kaart 5. Verdamping en gewasgroei in juli 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale groene stof.



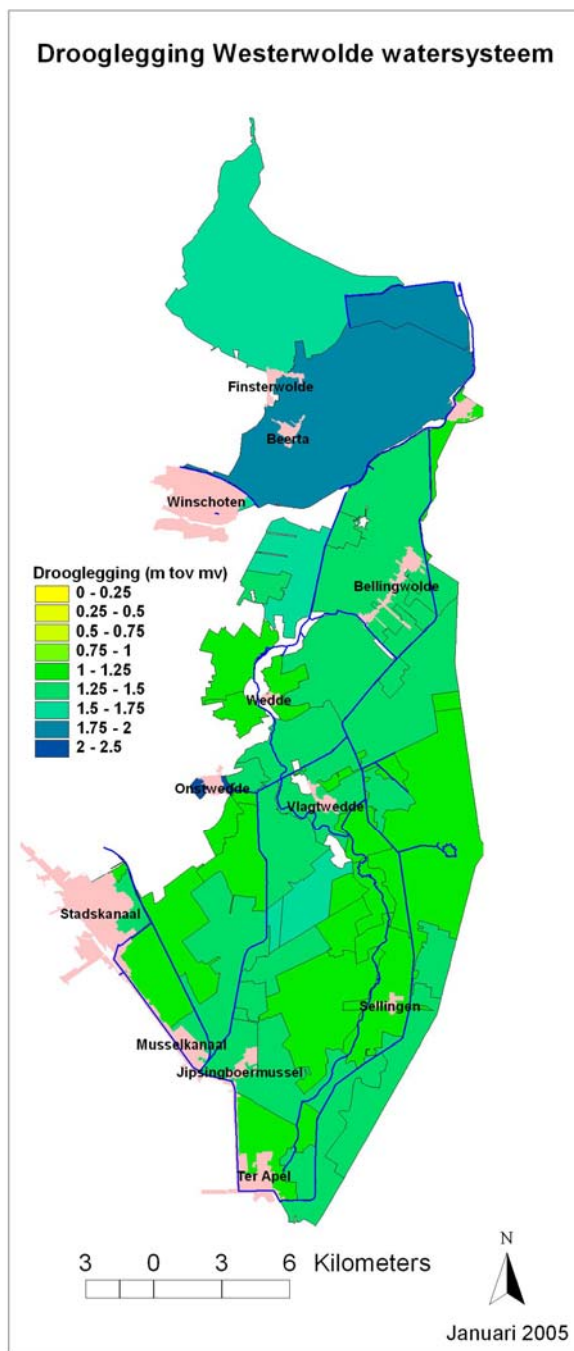
Kaart 6. Verdamping en gewasgroei in augustus 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale groene stof.



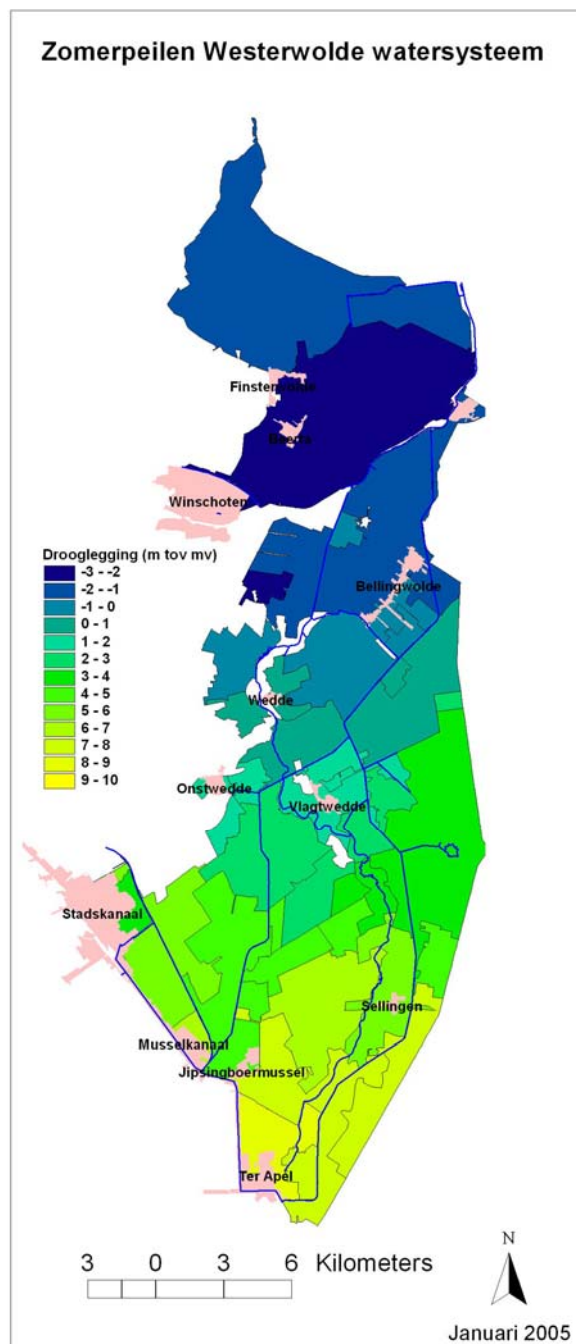
Kaart 7. Locaties van de kunstwerken waar debietmetingen voor beschikbaar zijn.



Kaart 8. Peilvakken (links) en de rekeneenheden (rechts) zoals gebruikt voor de FutureView methode.



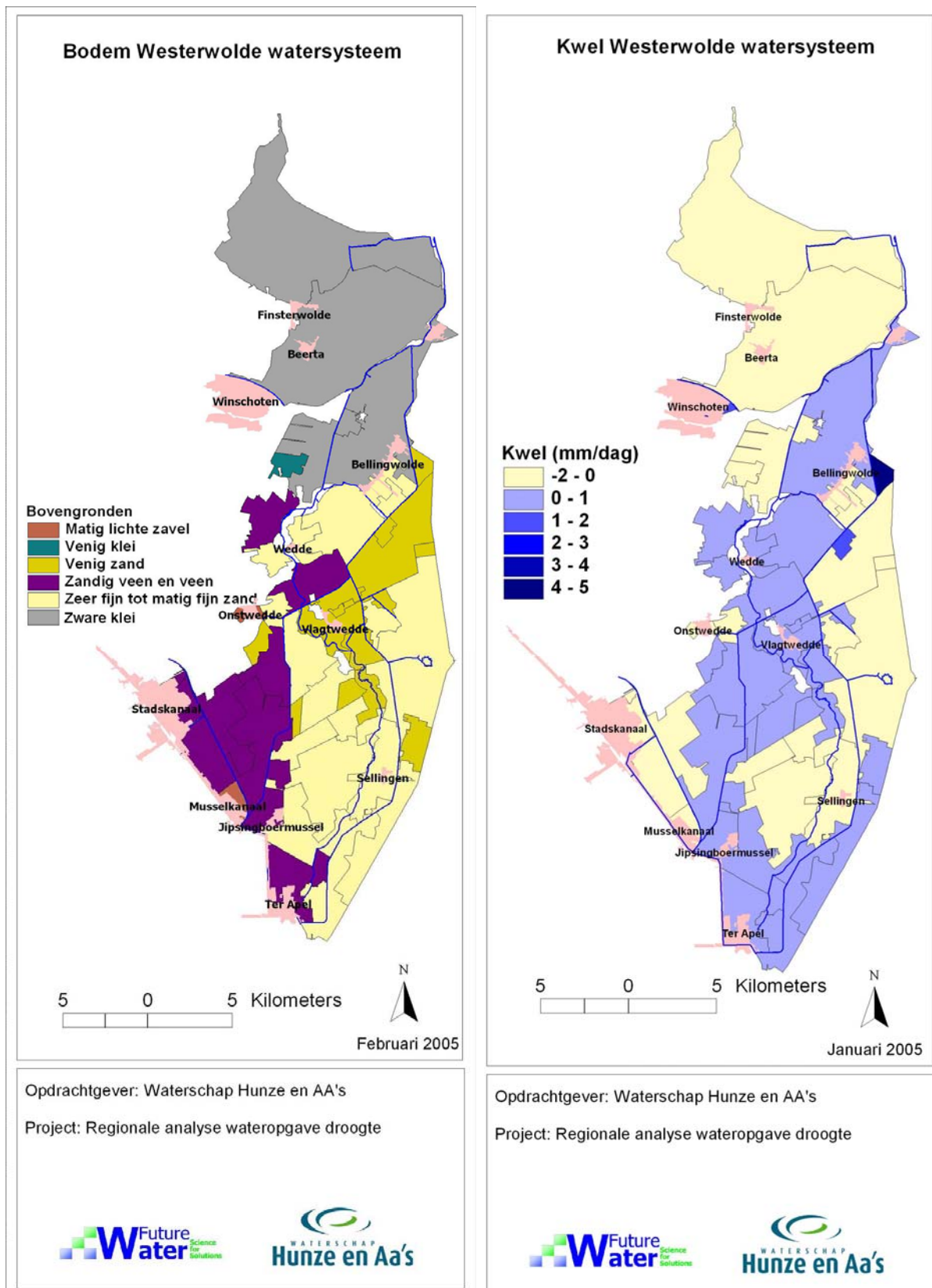
Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Project: Regionale analyse wateropgave droogte



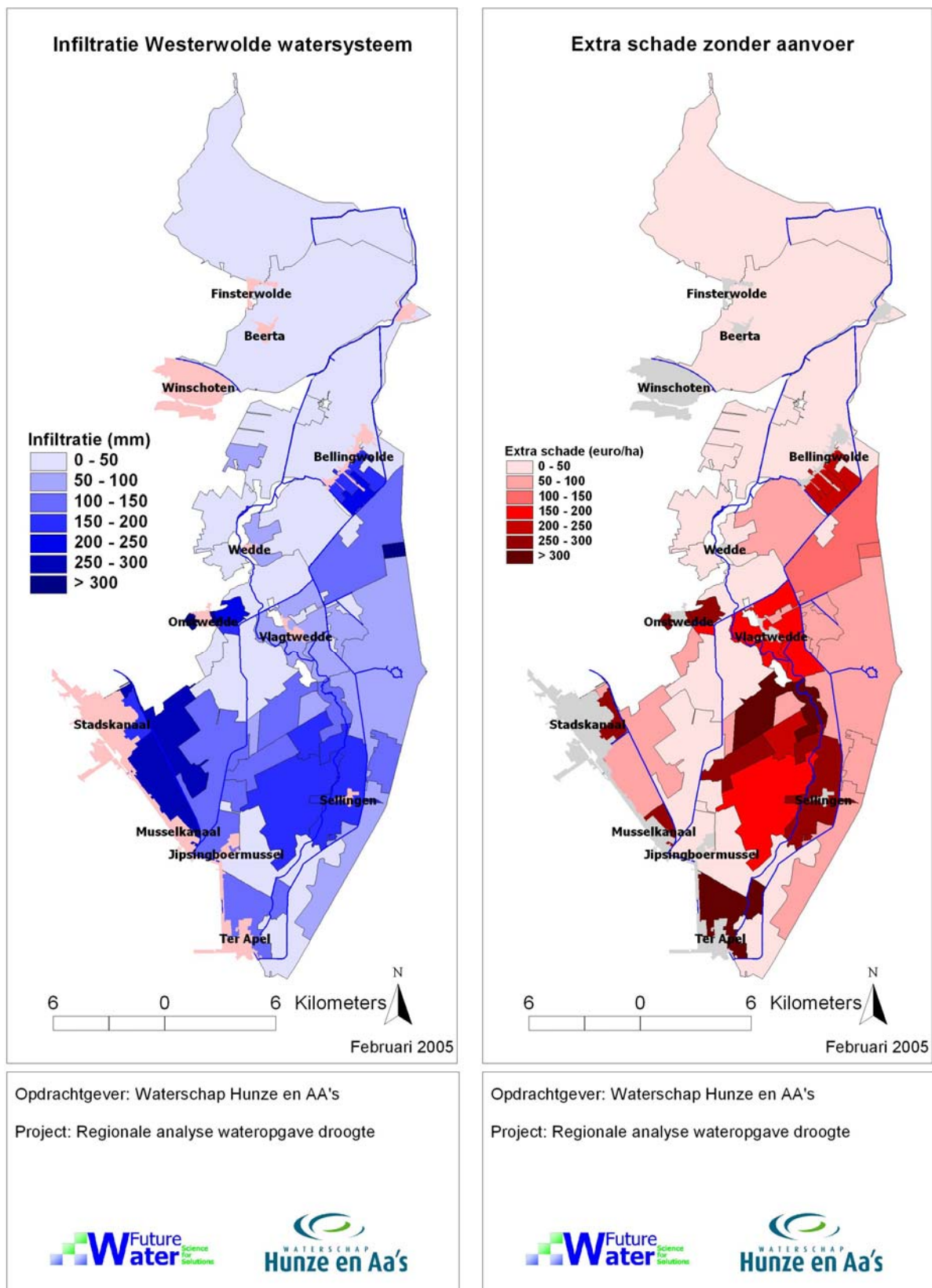
Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Project: Regionale analyse wateropgave droogte



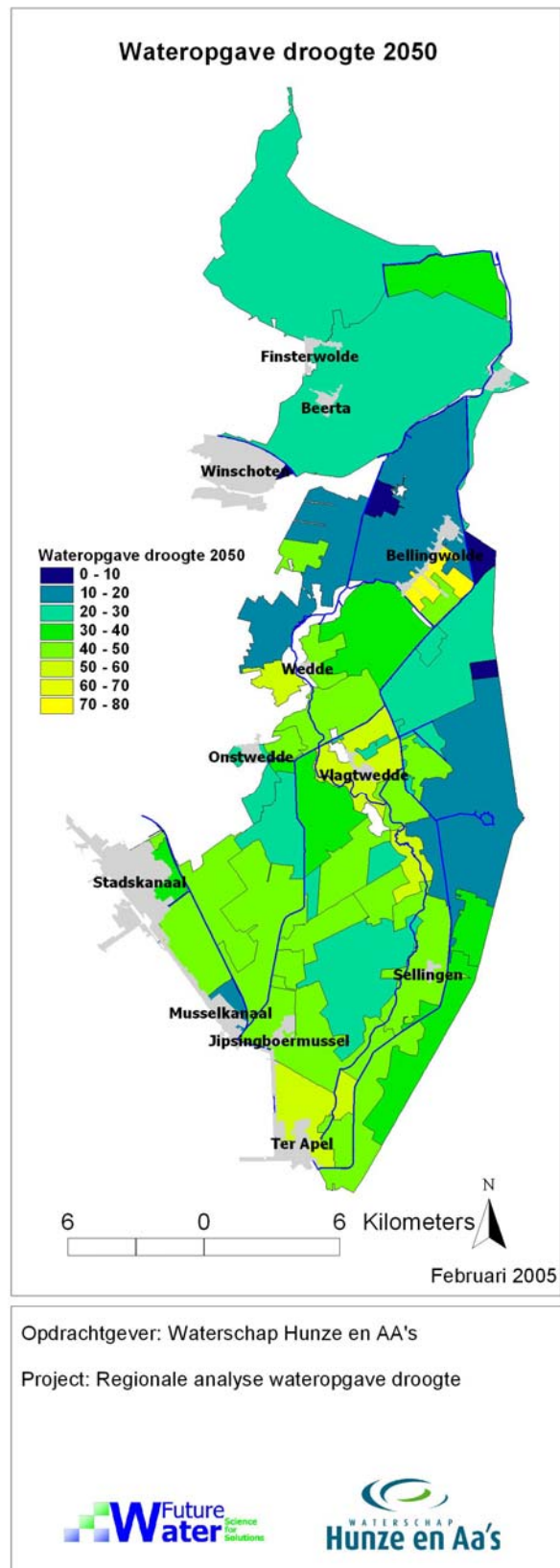
Kaart 9. Drooglegging (links) en zomerpeil (rechts) per rekeneenheid.



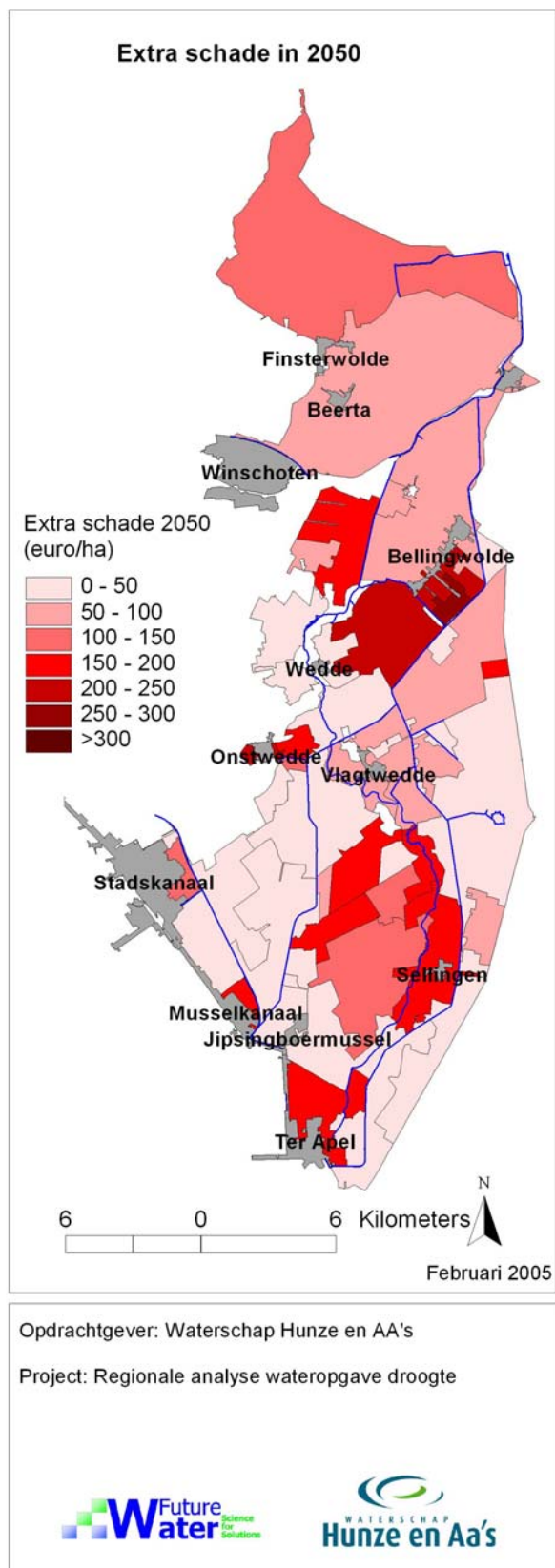
Kaart 10. Bodemtype (links) en kwel (rechts) per rekeneenheid.



Kaart 11. Infiltratie (links, in mm) en een schatting van de extra schade (rechts in Euro's per ha) indien geen wateraanvoer zou plaatsvinden. Resultaten hebben betrekking op de referentiesituatie 2003.



Kaart 12. Wateropgave droogte voor 2050 per rekeneenheid in (mm).



Kaart 13. Extra schade (in Euro's per ha) indien de wateraanvoer in 2050 gelijk zou zijn aan de wateraanvoer 2003.