



Wateropgave droogte Waterschap Hunze en Aa's:

West en Midden

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's





Wateropgave droogte Waterschap Hunze en Aa's:

West en Midden

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Uitvoerder: FutureWater

november 2005

This project has been co-funded by ERDF through the Interreg IIIIB 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)
R. Loeve (FutureWater)



Voorwoord

Watertekorten zullen in de toekomst een steeds prominentere rol gaan spelen voor waterbeheerders. Naast de toenemende vraag voor meer water van goede kwaliteit door verschillende sectoren zal klimaatverandering een belangrijke rol spelen. Extremen in droge en natte periode zullen toenemen, waardoor een goede analyse van de huidige en toekomstige watervraag noodzakelijk is. In het kader van het project Waterdrager heeft het Waterschap Hunze en Aa's dan ook besloten om voor het hele beheersgebied een analyse te maken van de huidige wateraanvoer en de te verwachten ontwikkelingen voor de toekomst. Met behulp van Remote Sensing gegevens en de FutureView methode is deze analyse uitgevoerd en resultaten en conclusies staan weergegeven in dit rapport.

Jan den Besten en Henk van Norel van Waterschap Hunze en Aa's worden bedankt voor de open discussies over de toegepaste methoden en gegevens, en voor de prettige sfeer waarin deze discussies plaats vonden.

Peter Droogers
Walter Immerzeel
Ronald Loeve

november 2005

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

Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE	5
2	METHODEN	7
2.1	FutureView methode	7
2.2	Rekeneenheden	8
2.3	Drainage en infiltratie	13
2.4	Infiltratie	17
2.5	Economische analyse	19
3	REMOTE SENSING VERDAMPING	21
3.1	Inleiding	21
3.2	SEBAL methode	21
3.3	Resultaten	22
4	REFERENTIESITUATIE	29
4.1	Validatie en kalibratie	29
4.2	Grondwaterstanden	29
4.3	Verdamping	30
5	ANALYSE WATERAANVOER	33
5.1	Overzicht	33
5.2	Evaluatie 2003 en effect wateraanvoer	33
5.3	Evaluatie 2050	36
5.3.1	Klimaatverandering	36
5.3.2	Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003	37
5.3.3	Evaluatie 2050: wateropgave droogte	38
6	CONCLUSIES	43
6.1	Methode	43
6.2	Analyse huidige wateraanvoer	43
6.3	Analyse 2050	44
7	LITERATUUR	47
	BIJLAGEN: GEDETAILLEERDE RESULTATEN PER WATERSYSTEEM	49

Tabellen

Tabel 1. Peilvakken en rekeneenheden in het studiegebied.	10
Tabel 2. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.	15
Tabel 3. Opbrengsten en prijzen voor een aantal gewassen zoals gebruikt in deze studie.....	19
Tabel 4. Resultaten van de verdampingsanalyses met de SEBAL methode.....	24
Tabel 5. Omzetting Gt bodemkaart 1:50.000 naar GHG, GLG en GVG. (Stowa, 2003).....	30
Tabel 6. Actuele verdamping voor de SEBAL en de FutureView methode voor de referentie situatie (2003) per watersysteemgebied.	31
Tabel 7. Effect van wateraanvoer voor het jaar 2003 per watersysteemgebied.	34
Tabel 8. Infiltratie voor de referentiesituatie en de 2050 situatie voor het bepalen van de wateropgave droogte.	39
Tabel 9. Wateropgave droogte voor alleen de wateraanvoer gebieden. "Oppervlak" geeft aan welk percentage van het betreffende gebied in de wateraanvoergebieden ligt.	40
Tabel 10. Samenvatting van de belangrijkste resultaten als totalen voor het gehele studiegebied.	40
Tabel 11. Samenvatting van de belangrijkste resultaten als totalen voor de zes watersysteemgebieden afzonderlijk.	41
Tabel 12. Resultaten FutureView voor 2003 referentie.	50
Tabel 13. Resultaten FutureView voor 2003 geen wateraanvoer.	51
Tabel 14. Resultaten FutureView voor 2050 wateraanvoer gelijk aan 2003.....	52
Tabel 15. Resultaten FutureView voor 2050 met opbrengst gelijk aan 2003.....	53

Figuren

Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model.	8
Figuur 2. Peilvakken in het studiegebied.....	9
Figuur 3. Watersysteemgebieden binnen het beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's en geanalyseerd gedurende deze studie.	10
Figuur 4. De 202 rekeneenheden in het studiegebied.....	11
Figuur 5. Gemiddelde hoogte per rekeneenheid.	12
Figuur 6. Gemiddelde drooglegging per rekeneenheid.....	12
Figuur 7. Kwel (positief) en wegzijging (negatief) volgens de STONE database per rekeneenheid.	13
Figuur 8. Aanwezigheid buisdrainage volgens de STONE database.....	15
Figuur 9. Drainageweerstand in dagen voor de drie drainagesystemen volgens de STONE database.	16
Figuur 10. Slootdichtheid in meters per gridcel van 250 m volgens de STONE database.	16
Figuur 11. Gevoelighedsanalyse voor de infiltratieweerstand (in dagen) op de infiltratie voor een rekeneenheid (185) in het watersysteem Duurswold.....	18
Figuur 12. Gevoelighedsanalyse voor de infiltratieweerstand (in dagen) op het verdampingstekort voor een rekeneenheid (nr. 185) in het watersysteem Duurswold.....	18
Figuur 13. Effect van infiltratie op het verdampingstekort voor een rekeneenheid (185) in het watersysteem Duurswold.....	18
Figuur 14. Maandelijkse potentiële en actuele verdamping en biomassa ontwikkeling voor 2003 voor het hele beheersgebied van Hunze en Aa's, zoals berekend met NOAA SEBAL.....	23
Figuur 15. Verdampingstekort voor de zomer 2003 uit de remote sensing SEBAL methode voor de zes watersysteemgebieden.	24
Figuur 16. Verdamping en gewasgroei in mei 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse.....	25
Figuur 17. Verdamping en gewasgroei in juni 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse.	26
Figuur 18. Verdamping en gewasgroei in juli 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse.....	27
Figuur 19. Verdamping en gewasgroei in augustus 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse.....	28
Figuur 20. Grondwaterstanden gesimuleerd en volgens de grondwatertrappen van de bodemkaart.	30
Figuur 21. Potentiële verdamping volgens Remote Sensing en FutureView.	32
Figuur 22. Actuele verdamping volgens Remote Sensing en FutureView voor de 202 rekeneenheden.....	32
Figuur 23. Gemiddelde grondwaterstand voor de referentiesituatie.	35
Figuur 24. Infiltratie voor de referentiesituatie.	35
Figuur 25. Gemiddelde gewasopbrengst voor de referentiesituatie.	36
Figuur 26. Landbouwschade als gevolg van klimaatverandering.....	38
Figuur 27. Wateropgave droogte per rekeneenheid.....	39
Figuur 28. Aardappel en tarwe opbrengst over de afgelopen 40 jaar.....	45

1 Introductie

Wateraanvoer is voor Waterschap Hunze en Aa's een belangrijk onderdeel van het totale waterbeheer. In circa 75 % van de oppervlakte van het beheersgebied van het waterschap is naast waterafvoer, wateraanvoer mogelijk. De mogelijkheid van wateraanvoer is met name op de gronden gelegen op de Hondsrug en het Drents Plateau niet mogelijk c.q. niet aanwezig. IJsselmeerwater wordt bij Lemmer ingelaten en via de Friese en Noorderzijvestboezem naar het Groningse deel van het beheersgebied aangevoerd. Anderzijds vindt de aanvoer plaats via de Hoozeveensche Vaart naar met name de Drentse Veenkoloniën.

Een eerdere studie naar de wateropgave droogte voor het Westerwoldse gebied heeft de mogelijkheden van de FutureView methode laten zien (Droogers en Immerzeel, 2005). Een aantal scenario's zijn toen doorgerekend en de uiteindelijke conclusies lieten zien dat de wateropgave droogte (gedefinieerd als "de hoeveelheid water die extra aangevoerd moet worden in 2050 om de effecten van klimaatverandering te compenseren") voor het betreffende gebied 7.000.000 m³ bedraagt (~16 mm). Het effect van het volledig stoppen van wateraanvoer zonder rekening te houden met klimaatverandering zou een schadepost voor de landbouw van ongeveer € 90 per ha betekenen.

Deze studie richt zich op de andere watersystemen in het beheersgebied van Hunze en Aa's en volgt dezelfde aanpak als de Westerwoldse studie. Een aantal verbeteringen gebaseerd op de ervaringen van de eerste studie en nieuwe inzichten zijn in deze studie meegenomen. De belangrijkste verbeteringen zijn in de tekst verder toegelicht en kunnen puntsgewijs worden samengevat als:

- Kleinere rekeneenheden
- STONE database volledig meegenomen
- CO₂ effect meegenomen in de conclusies
- Differentiatie gewassen binnen één rekeneenheid voor de economisch analyse.

In deze studie zijn een viertal scenario's geanalyseerd:

- Evaluatie 2003: werkelijke aanvoer (referentiesituatie)
- Evaluatie 2003: geen wateraanvoer
- Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003
- Evaluatie 2050: wateropgave droogte

Het rapport beschrijft als eerste de methode en uitgangspunten (hoofdstuk 2). Vervolgens wordt voor het jaar 2003 de resultaten van een Remote Sensing analyse beschreven (hoofdstuk 3), die tevens gebruikt wordt voor het bouwen, kalibreren en valideren van de FutureView methode (hoofdstuk 4). Vervolgens worden de resultaten van de vier scenario's behandeld (hoofdstuk 5) en wordt afgesloten met de conclusies.

2 Methoden

2.1 FutureView methode

De FutureView methode is volledig gebaseerd op het SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) model met een actieve koppeling naar een geografische 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 model simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. Figuur 1 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).

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 grondwaterspiegel (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).

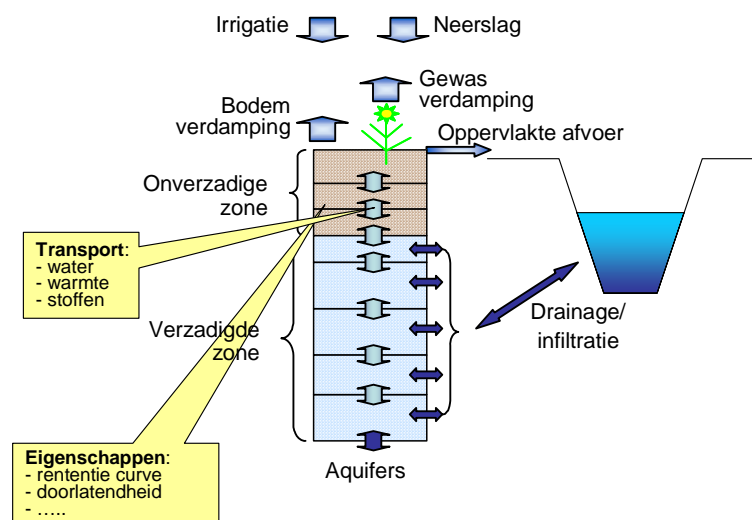
De FutureView methode is in het verleden toegepast om soortgelijke vraagstukken zoals deze te analyseren. Voor de Watersystemen Westerwolde en Veenkoloniën is gekeken wat de aanvoerbehoefte nu is en wat de aanvoerbehoefte in 2050 onder klimaatverandering zal zijn. Voor Waterschap Zuiderzeeland is gekeken hoe kwel en wegzijging processen ruimtelijk en in de tijd verlopen in de Noordoostpolder. Mogelijkheden voor het vasthouden van water zijn voor Flevoland geanalyseerd, om zodoende de trits vasthouden—bergen—afvoeren te implementeren. Voor het wetterskip Fryslân is met behulp van FutureView onderzocht wat de invloed van veranderingen in buisdrainage zal zijn op de afvoer op de Friese boezem.

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 worden gevonden in diverse andere rapporten, publicaties en websites (<http://www.swap.alterra.nl>).



Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model.

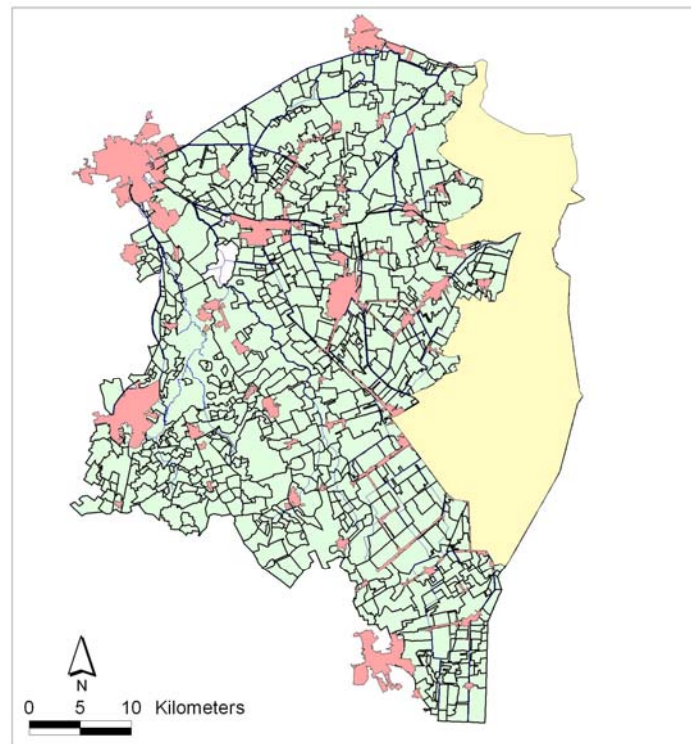
2.2 Rekeneenheden

De FutureView methode is gebaseerd op representatieve gebieden: de rekeneenheden. Afhankelijk van de vraag die beantwoordt moet worden, de hoeveelheid gegevens en tijd die beschikbaar is zal de gemiddelde grootte en het aantal rekenheden verschillen. In een eerdere studie voor het

Westerwoldse gebied zijn 46 rekeneenheden gebruikt. Deze 46 rekeneenheden waren gebaseerd op een indeling zoals vastgesteld in de "Visie Peilbeheer" (Hendriks 2003).

Deze studie zal zich concentreren op droogte en wateraanvoer en beslaat ook gebieden waar geen wateraanvoer plaatsvindt. Er is daarom voor gekozen om de peilvakken als uitgangspunt te nemen voor de rekeneenheden. Uit de eerdere studie voor het Westerwoldse gebied is ook gebleken dat meer detail wenselijk zijn om resultaten beter te kunnen toepassen in beleid en beheer. De gemiddelde grootte van de rekeneenheden in deze studie (794 ha) is dan ook wat kleiner dan de Westerwoldse studie (922 ha). Dit verschil is niet zo groot, maar in de Westerwoldse studie was het verschil in grootte van rekeneenheden aanzienlijk (standaardafwijking 1111 ha en in deze studie 498 ha). Ook was in de Westerwoldse studie 13% van de rekeneenheden groter dan 2000 ha en in deze studie slechts 3%.

In totaal liggen er in het studiegebied 929 peilvakken (Figuur 2), waarbij een groot aantal kleinere die, gezien de doelstelling van deze studie, voor de verdere analyses een ondergeschikte rol spelen. Bovendien zouden rekentijden ook groot zijn indien alle peilvakken zouden worden meegenomen. Er is daarom een aggregatie per Watersysteem (Figuur 3) uitgevoerd waarbij het totale aantal van 929 peilvakken is teruggebracht tot 202 rekeneenheden (Tabel 1 en Figuur 4). Deze aggregatie is uitgevoerd door de kleinste rekeneenheden samen te voegen met de dichtstbijzijnde grotere. Doordat gekozen is voor relatief kleine rekeneenheden is een verder criterium voor indeling minder van belang, omdat de rekeneenheden klein genoeg zijn om als homogeen te kunnen worden beschouwd.



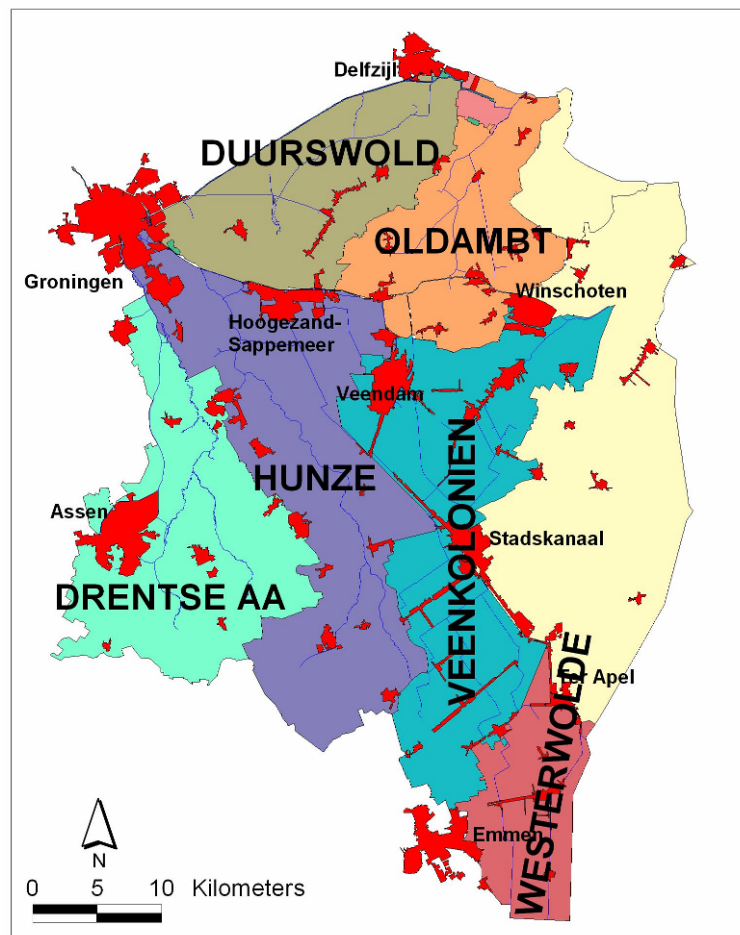
Figuur 2. Peilvakken in het studiegebied.

Tabel 1. Peilvakken en rekeneenheden in het studiegebied.

Watersysteem	Peilvakken	Rekeneenheden
Delfzijl	6	0
Drentse Aa	179	29
Duurswold	117	29
Hunze	201	49
Oldambt	111	27
Veenkoloniën	218	54
Westerwold	97	14
Totaal	929	202

Enkele aanvullende opmerkingen betreffende het proces om tot de rekeneenheden te komen:

- Handmatig zijn kleine oneffenheden in de peilvakken kaart verbeterd.
- Voor het watersysteem Delfzijl zijn de peilvakken samengevoegd tot één rekeneenheid en deze is voor de verdere analyses bij watersysteem Oldambt gevoegd.
- Het peilvak GPG-A-18 (groot peilgebied van de benedenloop van de Drentsche Aa, tussen Assen en Haren) is aan de hand van het AHN opgesplitst in vier kleinere gebieden.

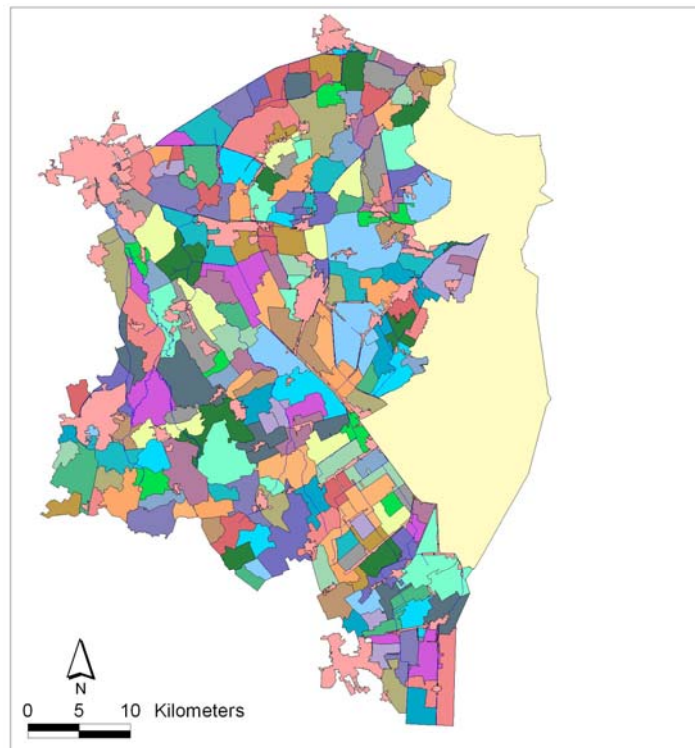


Figuur 3. Watersysteemgebieden binnen het beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's en geanalyseerd gedurende deze studie.

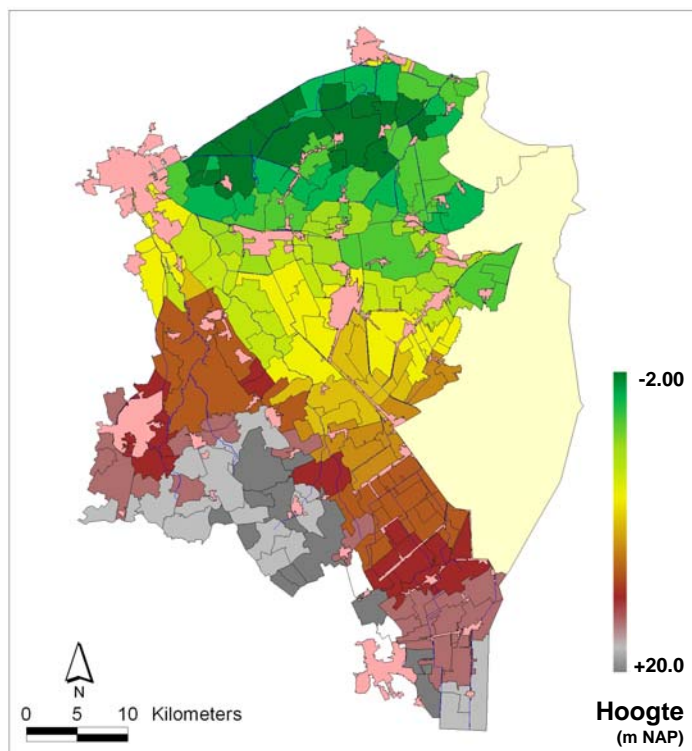
Voor elke rekeneenheid zijn vervolgens de gegevens die nodig zijn voor de FutureView analyses toegekend (tussen haakjes de bron):

- maaiveldhoogte (AHN)
- zomerpeil (legger: *Zomerpeil*)
- winterpeil (legger: *Winterpeil*)
- kwel (legger: *Kwelstroom*)
- drooglegging (legger: *Droogleggi*)
- drainageweerstand (STONE)
- slootafstanden (STONE)
- landgebruik (LGN4)

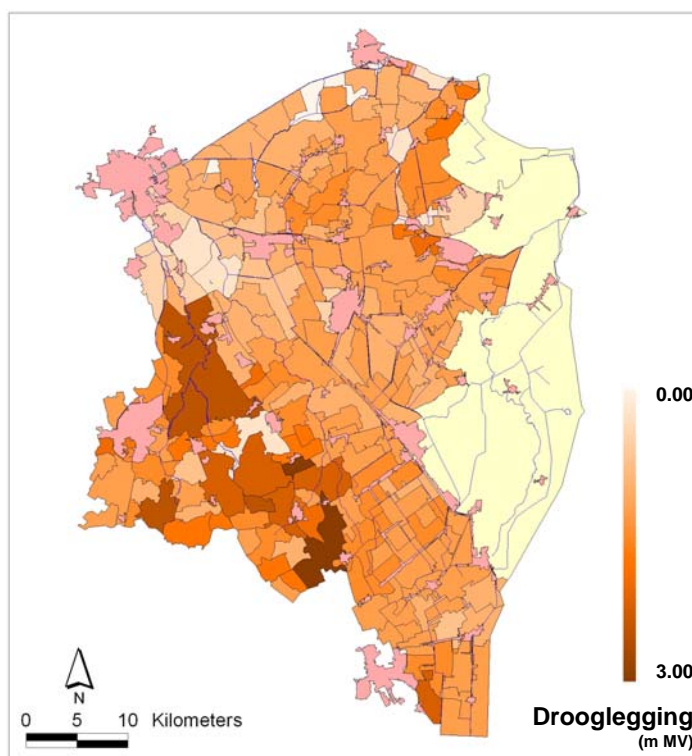
De ruimtelijke spreiding van enkele van de belangrijkste eigenschappen als gemiddelde per rekeneenheid zijn te zien in Figuur 5 (hoogte), Figuur 6 (drooglegging) en Figuur 7 (kwel en wegzijging).



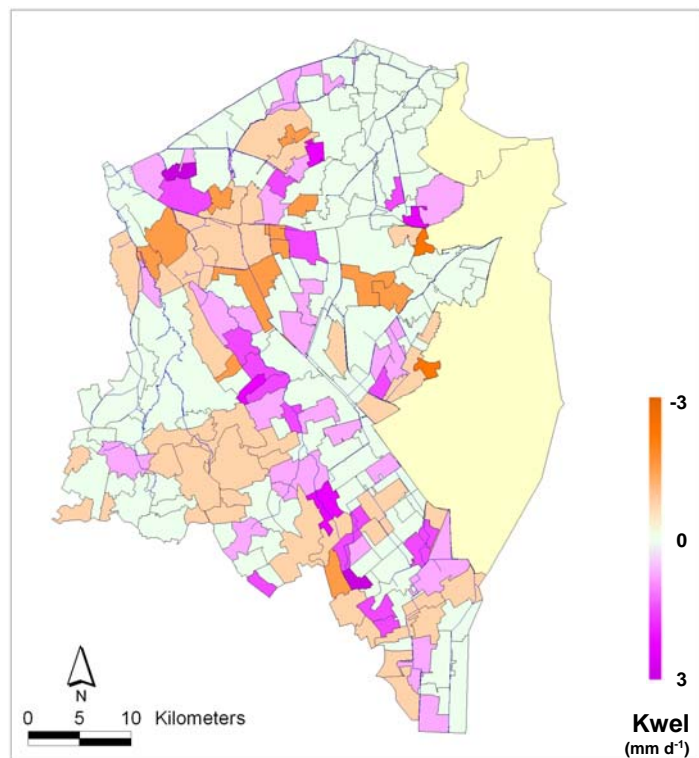
Figuur 4. De 202 rekeneenheden in het studiegebied.



Figuur 5. Gemiddelde hoogte per rekeneenheid.



Figuur 6. Gemiddelde drooglegging per rekeneenheid.



Figuur 7. Kwel (positief) en wegzijging (negatief) volgens de STONE database per rekeneenheid.

2.3 Drainage en infiltratie

Belangrijke eigenschappen die drainage en infiltratie¹ bepalen zijn drainageweerstanden en slootafstanden en zijn afkomstig uit de STONE-database. Deze STONE-database is tot stand gekomen met behulp van het SWAP model, dat de kern vormt van de voorgestelde FutureView methode, en sluit dus naadloos aan bij deze studie.

Het model STONE is gezamenlijk ontwikkeld door de instituten RIVM, RIZA en Alterra om beleidsvragen van de Ministeries van VROM, V&W en LNV ten aanzien van het mestbeleid te kunnen beantwoorden. STONE is geschikt om op landelijke schaal de uitspoeling van nitraat naar het grondwater en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater te berekenen voor verschillende bemestingsalternatieven. Tevens kan een schatting worden gemaakt van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem.

De hydrologische aspecten van STONE zijn samengesteld op basis van het SWAP model en worden toegepast in een aantal andere modellen zoals het bemestingsmodel CLEAN van het RIVM, het depositiemodel OPS van het RIVM, het uitspoelingsmodel ANIMO van Alterra en de ruimtelijke schematisatie van het RIZA. Deze ruimtelijke schematisatie voor STONE is gemaakt ten behoeve van de berekeningen voor de WaterSysteemVerkenningen (Kroon et al., 2001).

¹ met de term infiltratie wordt in dit rapport bedoeld: "kunstmatig infiltratie door wateraanvoer".

De belangrijkste gegevens uit STONE zijn:

- Buisdrainage
- Kwel
- Slootdichtheid
- Drainageweerstand.

De slootdichtheid speelt een belangrijke rol in het ontwateringsproces. Met behulp van het landelijke TOP10-vector databestand zijn voor drie verschillende drainagesystemen slootdichtheden bepaald. Deze gegevens zijn opgenomen in de STONE dataset als het aantal meters per gridcel van 250 meter. Voor praktische toepassingen en ook voor FutureView wordt echter de gemiddelde slootafstand toegepast. Om de slootdichtheid om te rekenen naar de gemiddelde slootafstand kan de volgende formule gebruikt worden:

$$\text{slootafstand} = \frac{\text{grid}}{\left[\frac{\text{slootdichtheid}}{\text{grid}} \right]}$$

Met een gridgrootte van 250 meter zoals gebruikt in STONE, kan deze formule dus geschreven worden als:

$$\text{slootafstand} = 62500 / \text{slootdichtheid}$$

Voor de het primaire, secundaire en tertiaire drainagesysteem is gebruik gemaakt van deze omrekening van de STONE database.

De weerstanden voor de drie grotere drainagesystemen zoals onderscheiden in STONE (Tabel 2) zijn weergegeven in Figuur 9. Er is hierbij gebruik gemaakt van het zogenaamde harmonisch gemiddelde per rekeneenheid:

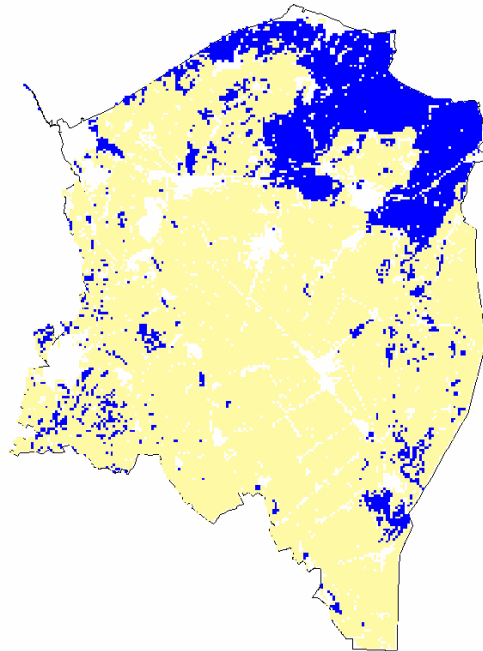
$$\frac{1}{H_y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{1}{Y_j}$$

Met H_y het harmonisch gemiddelde,
 n het aantal waarnemingen en
 Y de waarnemingen.

Er is gekozen voor het harmonisch gemiddelde om het kleine aantal hoge drainageweerstand niet extreem te laten meewegen. Met andere woorden, de kansverdeling van drainageweerstand is niet Gaussian maar log-normal.

Voor de berekeningen in SWAP zijn naast deze drie grotere drainagesystemen twee andere systemen onderscheiden: buisdrainage (Figuur 8) en maaiveldsdrainage (zie Tabel 2). Voor elk drainagesysteem zijn drainageweerstand en ontwateringsbases onderscheiden. Voor het primaire, secundaire en tertiaire systeem zijn deze gebaseerd op de methode zolas beschreven door De Lange (Kroon et al., 2001). Voor de buisdrainage is een weerstand van 100 dagen als standaard genomen. In de Westerwoldse studie is de maaiveldsdrainage niet als zodanig meegenomen. Een vergelijking voor een aantal rekeneenheden laat zien dat deze maaiveldsdrainage slechts een beperkte rol speelde in het droge jaar 2003 en dan alleen nog in december gedurende een aantal forse regenbuien. In de huidige studie is echter toch gekozen om deze maaiveldsdrainage wel mee te nemen.

Bij hoge grondwaterstanden gaat het maaiveld als drainagemiddel fungeren. Daarom wordt voor de berekeningen met SWAP een 5^e drainagemiddel onderscheiden: de maaiveldsdrainage. Bij een grondwaterstand van 20 cm onder maaiveld draagt al een redelijk deel van het maaiveld bij aan deze vorm van drainage. De weerstand bij deze diepte is relatief laag en naar schatting 30 dagen. Voor de ontwateringsbasis is een diepte van 20 cm onder maaiveld gekozen (Kroon et al., 2001).

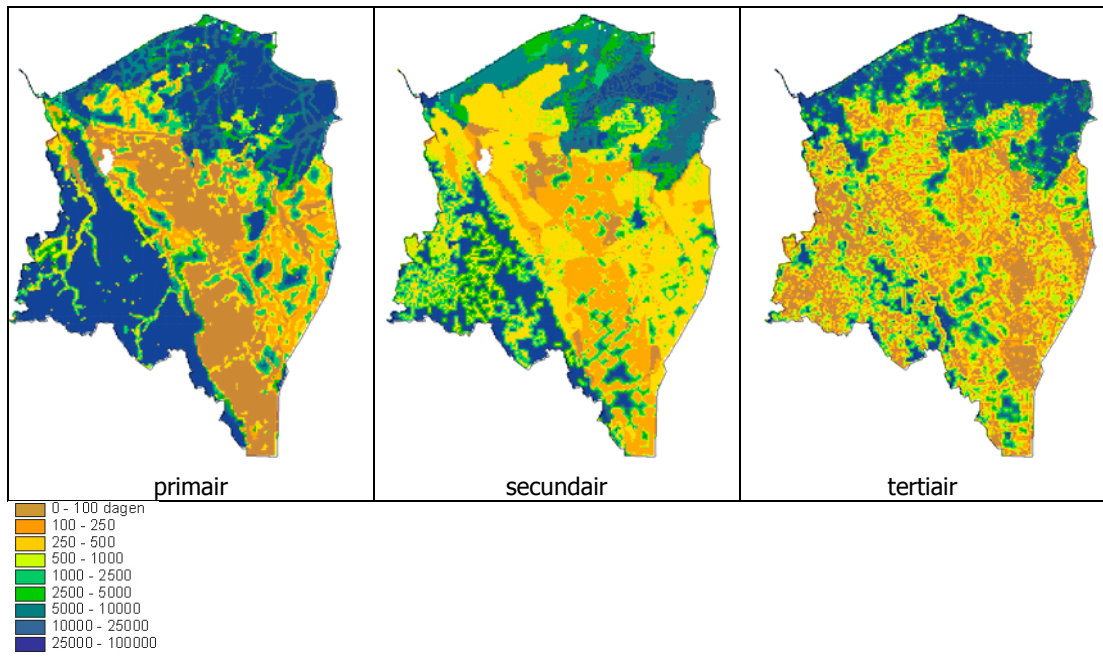


Figuur 8. Aanwezigheid buisdrainage volgens de STONE database.

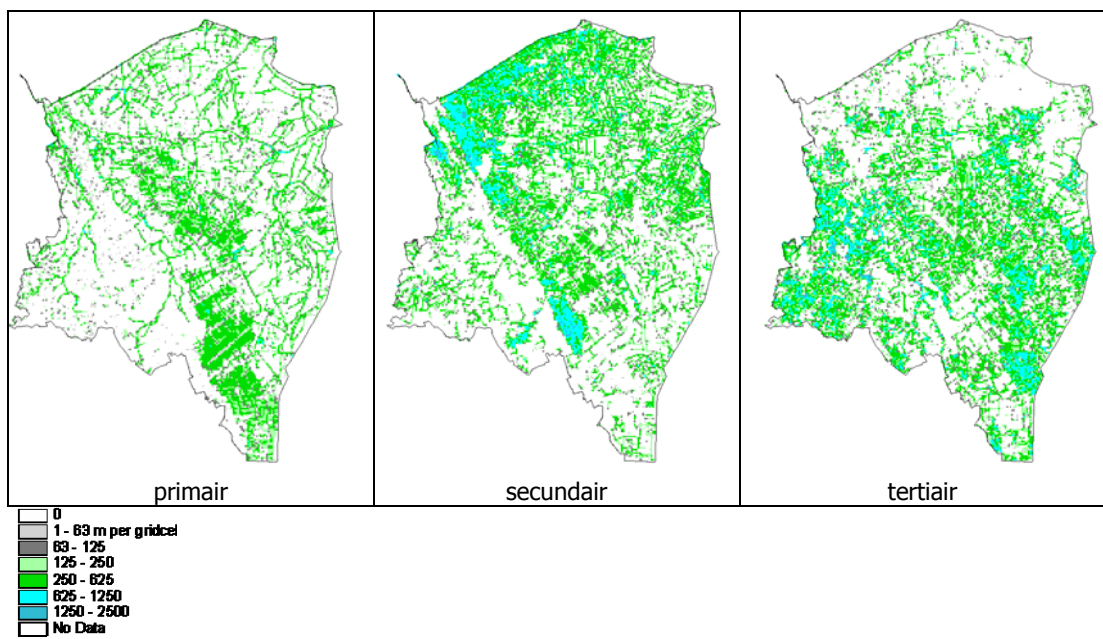
De interactie met het oppervlaktewater voor drainage en infiltratie wordt in SWAP gerepresenteerd met behulp van drie verschillende ontwateringssystemen. SWAP simuleert niet de volledige hydrodynamisch stroming in het oppervlaktewater zelf, maar gaat ervan uit dat in een deelgebied het openwaterpeil constant is volgens het zomer- en winterpeil uit de legger.

Tabel 2. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.

Drainagesysteem	Betekenis
Primair	Waterlopen 3 - 6 meter en waterlopen breder dan 6 meter
Secundair	Waterlopen smaller dan 3 meter
Tertiair	Greppels en droogvallende waterlopen
Buisdrainage	Buisdrainagesysteem
Maaiveldsdrainage	Oppervlakte drainage



Figuur 9. Drainageweerstanden in dagen voor de drie drainagesystemen volgens de STONE database.



Figuur 10. Slotdichtheid in meters per gridcel van 250 m volgens de STONE database.

2.4 Infiltratie

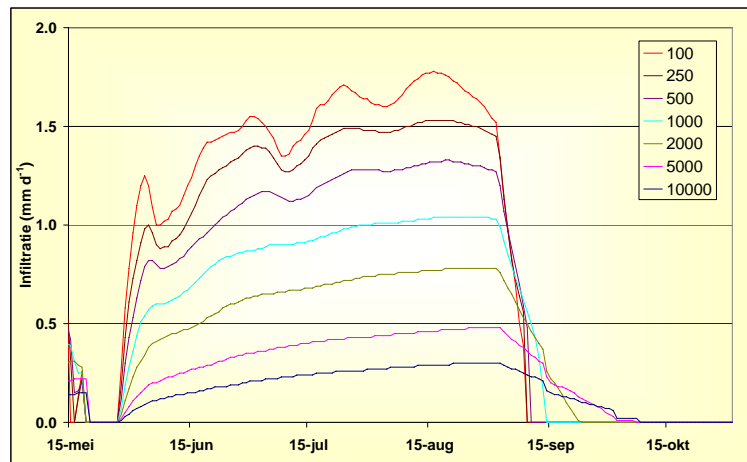
Wateraanvoer in de wateraanvoergebieden wordt voor het grootste gedeelte benut via infiltratie en slechts een klein gedeelte door beregening. Zoals eerder aangegeven wordt de term infiltratie in deze studie gebruikt voor "kunstmatige infiltratie door wateraanvoer". Er zal namelijk ook een kleine hoeveelheid infiltratie plaatsvinden in gebieden buiten de wateraanvoer, door aanwezig water in de sloten of een kleine herverdeling tussen peilvakken. Aangezien deze hoeveelheid relatief klein is, en bovendien niet van belang om de wateropgave droogte te bepalen, is dit in deze studie niet meegenomen.

De FutureView methode zoals hier toegepast berekent zelf de hoeveelheid water die infiltreert vanuit de sloten naar de wortelzone. Dit is een functie van verschillende factoren zoals: vochttoestand wortelzone, slootpeil en de infiltratieweerstand. Met name deze laatste eigenschap is moeilijk te bepalen en is alleen beschikbaar vanuit de eerder genoemde STONE dataset.

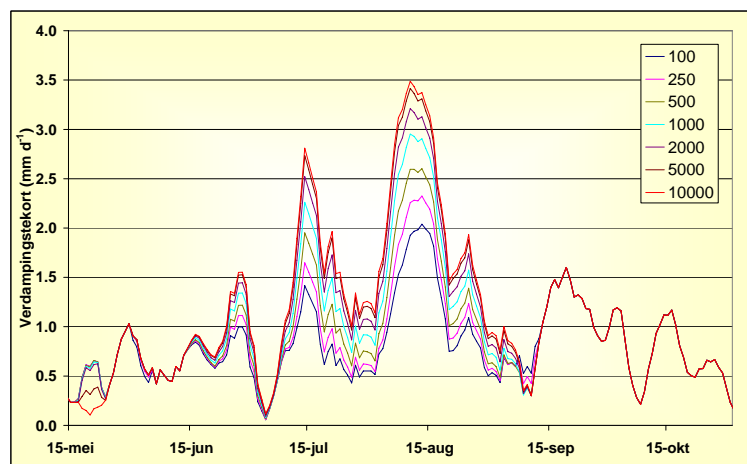
Om de gevoeligheid van deze infiltratieweerstand te bepalen is voor één rekeneenheid, nr. 185 in het watersysteemgebied Duurswold met een zware kleigrond, FutureView een aantal malen doorgerekend met verschillende infiltratieweerstanden. Uit Figuur 11 blijkt duidelijk dat deze infiltratieweerstand een belangrijke factor vormt voor de hoeveelheid water die infiltreert. Uit eerdere grondwaterstudies bij het waterschap kwam duidelijk naar voren dat de infiltratieweerstanden voor de kleigebieden te laag was en met een factor twee verhoogd moesten worden voor een realistisch scenario. In deze studie is deze factor twee dan ook toegepast.

Alhoewel de infiltratieweerstand een groot effect heeft op de hoeveelheid infiltratie is het effect op de verdamping minder groot. Figuur 12 laat zien dat het effect van de gekozen infiltratieweerstand op het verdampingstekort minder groot is. Uiteraard zorgt een lagere infiltratieweerstand voor een lager verdampingstekort, maar van de hoeveelheid water die infiltreert kan slechts een gedeelte (ongeveer eenderde) werkelijk worden gebruikt om het verdampingstekort te verminderen (Figuur 13). De rest verdwijnt naar het grondwater of zal weer draineren naar het oppervlaktewater. Uiteraard hangt dit van een veelheid van processen en eigenschappen af (bodem, kwel, slootpeil, gewas), maar deze worden alle meegenomen in de FutureView methode.

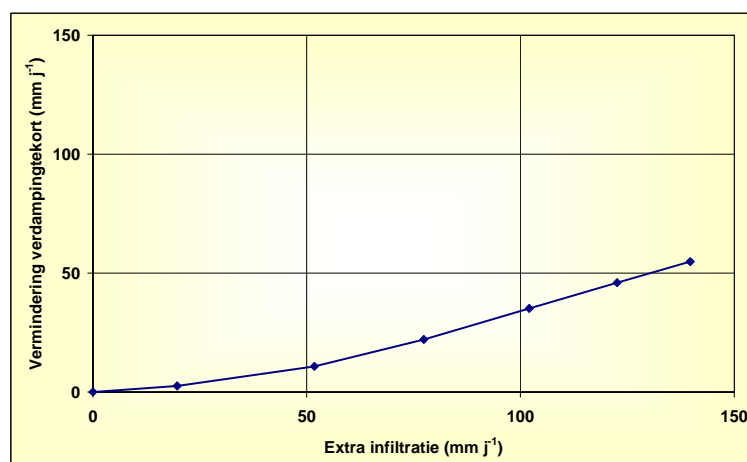
Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de infiltratieweerstand slecht bekend is, veel invloed heeft op de hoeveelheid water die infiltreert, maar minder invloed heeft op het verdampingstekort. Dit betekent dat tevens de wateropgave ook in mindere mate wordt beïnvloed door de gebruikte infiltratieweerstand.



Figuur 11. Gevoeligheidsanalyse voor de infiltratieweerstand (in dagen) op de infiltratie voor een rekenenheid (185) in het watersysteem Duurswold.



Figuur 12. Gevoeligheidsanalyse voor de infiltratieweerstand (in dagen) op het verdampingstekort voor een rekenenheid (nr. 185) in het watersysteem Duurswold.



Figuur 13. Effect van infiltratie op het verdampingstekort voor een rekenenheid (185) in het watersysteem Duurswold.

2.5 Economische analyse

Gezien de opzet en de doelstelling van deze studie is geen volledige economische analyse van de kosten en baten van wateraanvoer uitgevoerd. Er is wel een schatting gemaakt van de bruto opbrengsten van gewassen door de berekende droogteschade uit FutureView te vermenigvuldigen met de potentiële opbrengst en de gemiddelde prijs van de gewassen (Tabel 3). De waarden in Tabel 3 zijn afkomstig uit het LEI (2005) en zijn globale gemiddelden waarden voor Nederland in 2003. In de studie voor het Westerwoldse gebied zijn iets andere prijzen aangehouden die afkomstig waren uit Van der Meer (2004) en betrekking hadden op een gedeelte van 2003. Voor bos is een ruwe aanname gedaan die vooral als doel heeft om de waarde van bos ook in economische termen te kunnen uitdrukken.

Tabel 3. Opbrengsten en prijzen voor een aantal gewassen zoals gebruikt in deze studie.

Gewas	Potentiële opbrengst ton ha ⁻¹	Gemiddelde prijs € ton ⁻¹
Aardappelen	44	103
Granen	10	124
Gras	15	39
Bos	10	25

3 Remote Sensing verdamping

3.1 Inleiding

De actuele verdamping van een gebied en met name het verdampingstekort geeft aan in hoeverre het waterbeheer voor het betreffende gebied optimaal is. Uiteraard zijn er een aantal andere factoren die tevens een verdampingstekort kunnen veroorzaken, bijvoorbeeld ziekten en plagen, maar in Nederland zijn deze omstandigheden vaak klein ten opzichte van verdampingstekorten door droogte (ervan uitgaande dat te natte omstandigheden niet voorkwamen in 2003). Een niet optimale verdamping is echter niet automatisch te herleiden tot slecht waterbeheer, aangezien er ook processen meespelen waar waterbeheerders geen invloed op hebben. Feit blijft dat een verdampingstekort wel aangeeft waar knelpunten liggen die opgelost dienen te worden.

Voor het gehele beheersgebied van het Waterschap Hunze en Aa's zijn voor het jaar 2003 met behulp van de SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) remote sensing techniek verdampingskaarten afgeleid. Hieronder volgt een korte samenvatting van de SEBAL methode en daarna worden de resultaten besproken.

3.2 SEBAL methode

De SEBAL remote sensing methode (Bastiaanssen et al., 2003) is gebaseerd op het oplossen van de stralingsbalans met behulp van optische satelliet waarnemingen en is gebaseerd op reflecties van zichtbaar en vooral niet-zichtbaar licht. 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 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, wrijvingsnelheden en thermische convectie in het overgangsgedebied 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 terreineigenschappen), 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.

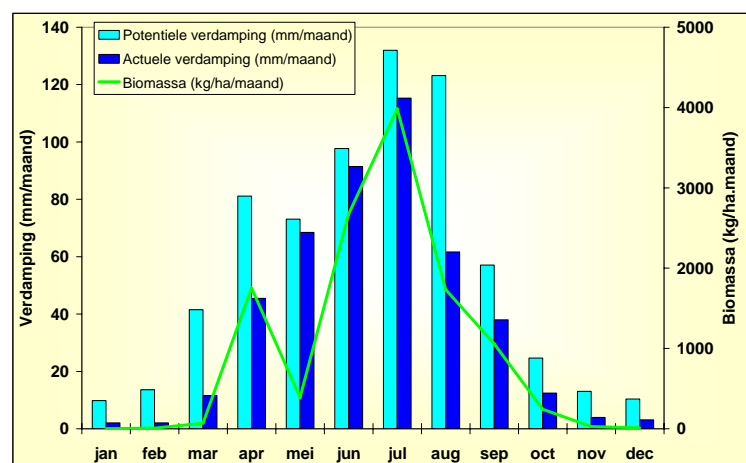
De SEBAL energiebalansberekeningen kunnen alleen worden uitgevoerd als de satellietbeelden onbewolkt zijn. Het resultaat van λE wordt dan gebruikt om r_s actuele oppervlakte weerstand voor verdamping te kwantificeren. Door de inversie van de Penman-Monteith vergelijking kan r_s voor onbewolkte dagen 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.

3.3 Resultaten

Voor het hele jaar 2003 zijn met behulp van de SEBAL methode wekelijkse verdampingskaarten gemaakt voor het gehele beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's (Figuur 16 tot en met Figuur 19). De actuele verdamping in deze vier maanden is het hoogst in juli (120 mm) en het laagst in augustus (65 mm) en voor alle vier 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 veroorzaakt. 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 (80 mm) dan in augustus (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 verdrogings situatie. 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. Het gemiddelde verdampingstekort in het beheersgebied in augustus ligt rond de 60 mm. 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. 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 watertekort.

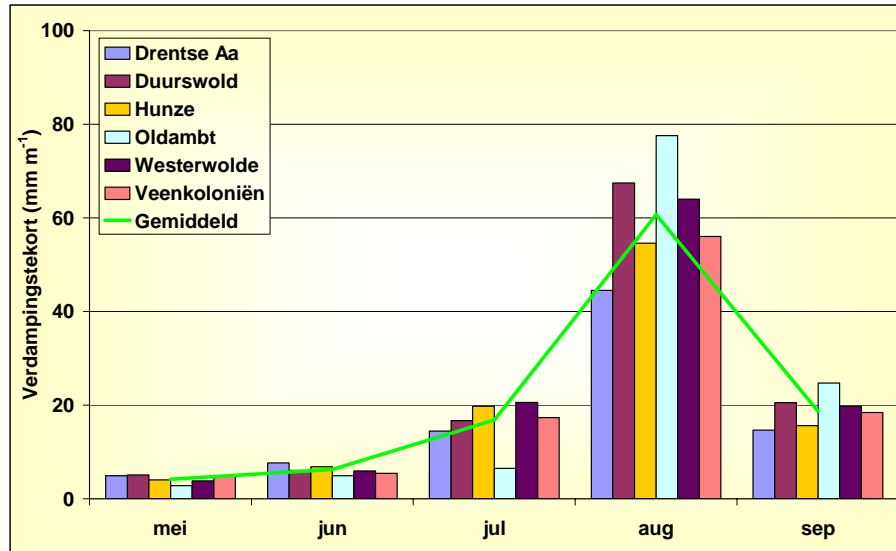


Figuur 14. Maandelijkse potentiële en actuele verdamping en biomassa ontwikkeling voor 2003 voor het hele beheersgebied van Hunze en Aa's, zoals berekend met NOAA SEBAL.

In Figuur 14 zijn de actuele en potentiële verdamping en de biomassa productie per maand weergegeven voor het gehele beheersgebied. 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 15 laat het verdampingstekort zien zoals dit uit de SEBAL analyses naar voren komt voor de zes watersysteemgebieden. De hoge verdampingstekorten die te zien zijn voor Duurswold en met name voor Oldambt worden veroorzaakt doordat de aanwezige granen al voor een groot gedeelte geoogst

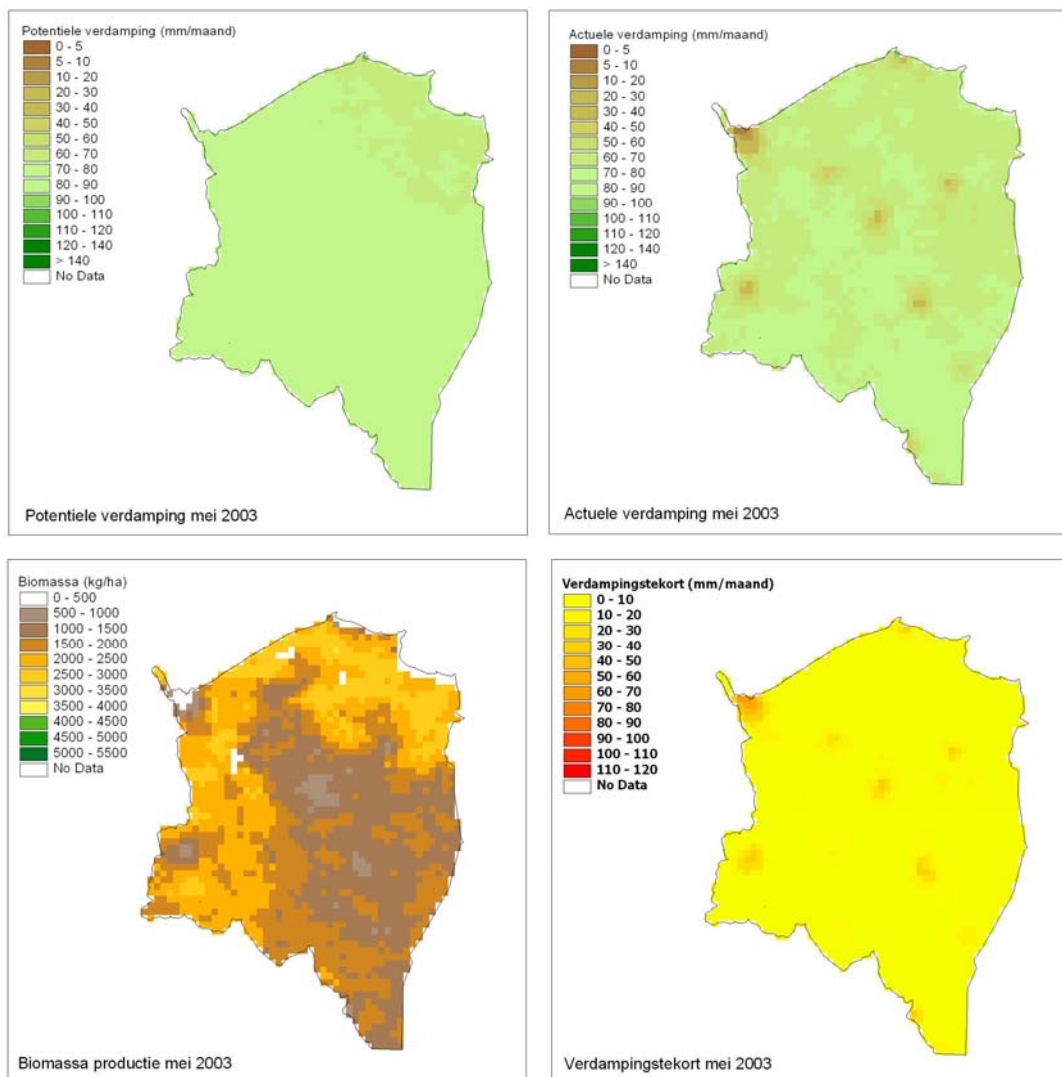
zijn. Hierdoor neemt de actuele verdamping sterk af en lijkt er dus een groot verdampingstekort te bestaan. In Figuur 19 is duidelijk te zien dat de biomassa productie in augustus voor deze graangebieden laag is en dat het verdampingstekort dus geen invloed meer heeft op de gewasogst.



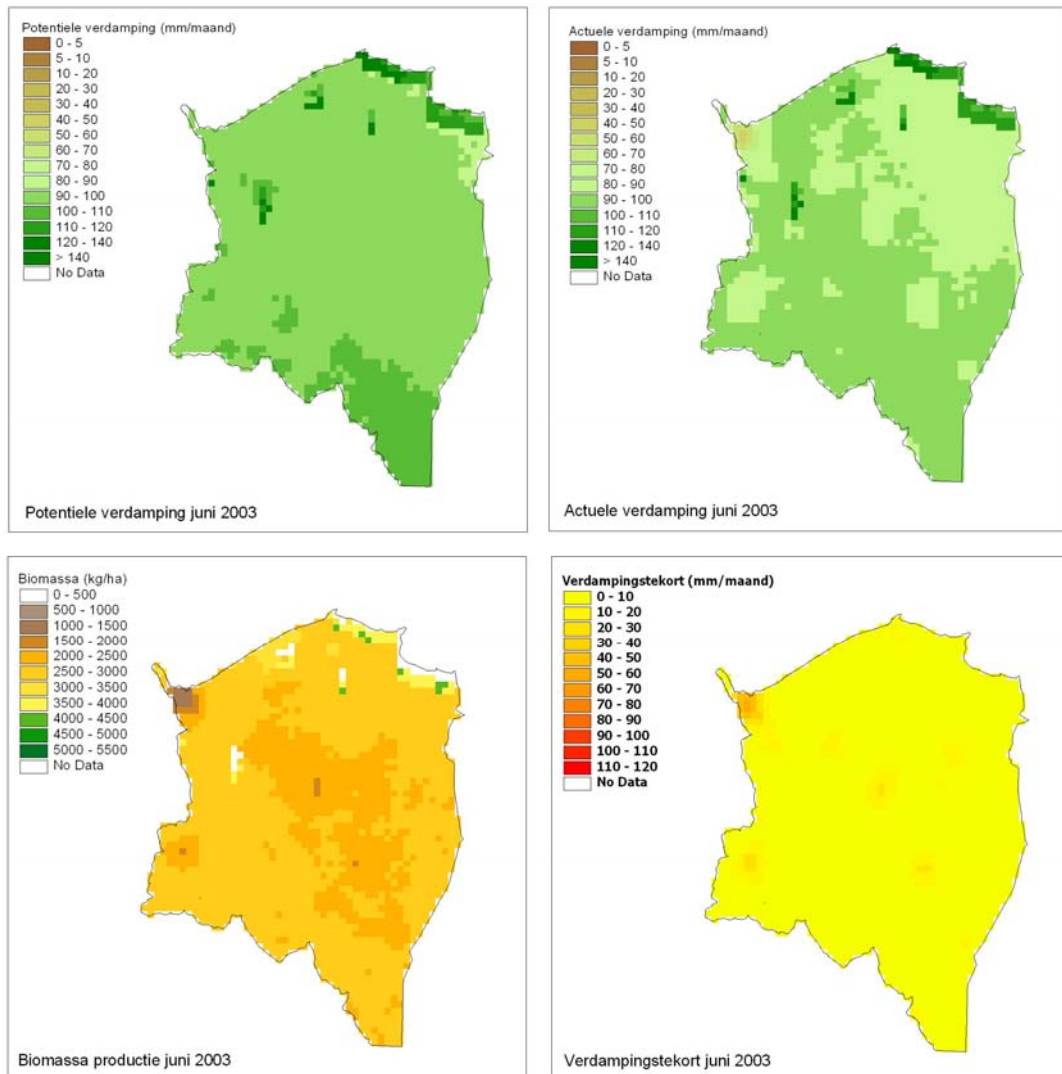
Figuur 15. Verdampingstekort voor de zomer 2003 uit de remote sensing SEBAL methode voor de zes watersysteemgebieden.

Tabel 4. Resultaten van de verdampingsanalyses met de SEBAL methode. Variatie geeft de standaardafwijking aan in verdampingstekort.

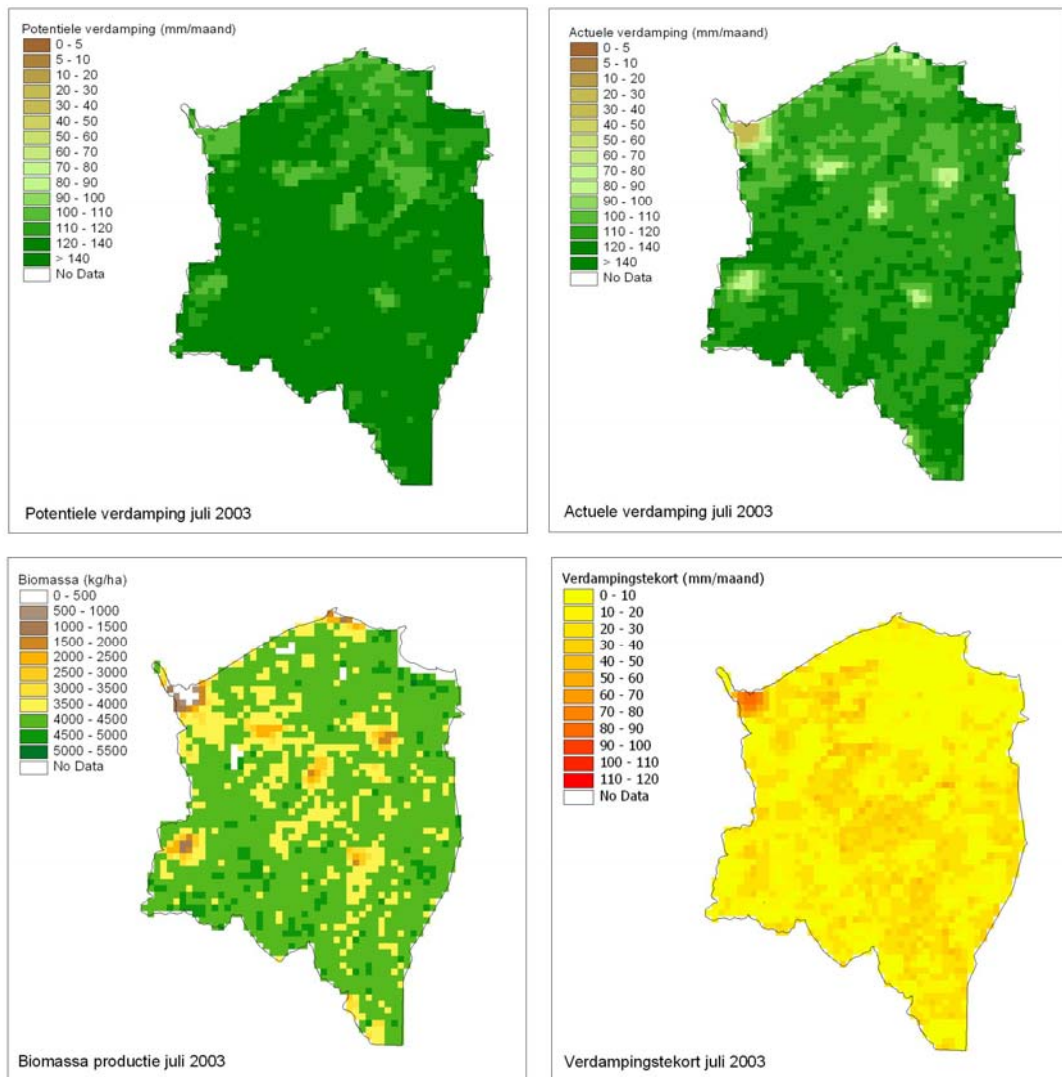
	Actueel (mm)	Potentieel (mm)	Tekort (mm)	Variatie (mm)
Drentse Aa	447	563	116	32
Duurswold	409	554	144	37
Hunze	431	569	138	35
Oldambt	392	542	150	12
Westerwolde	415	571	156	26
Veenkoloniën	445	590	145	24
Gemiddeld	424	565	141	32



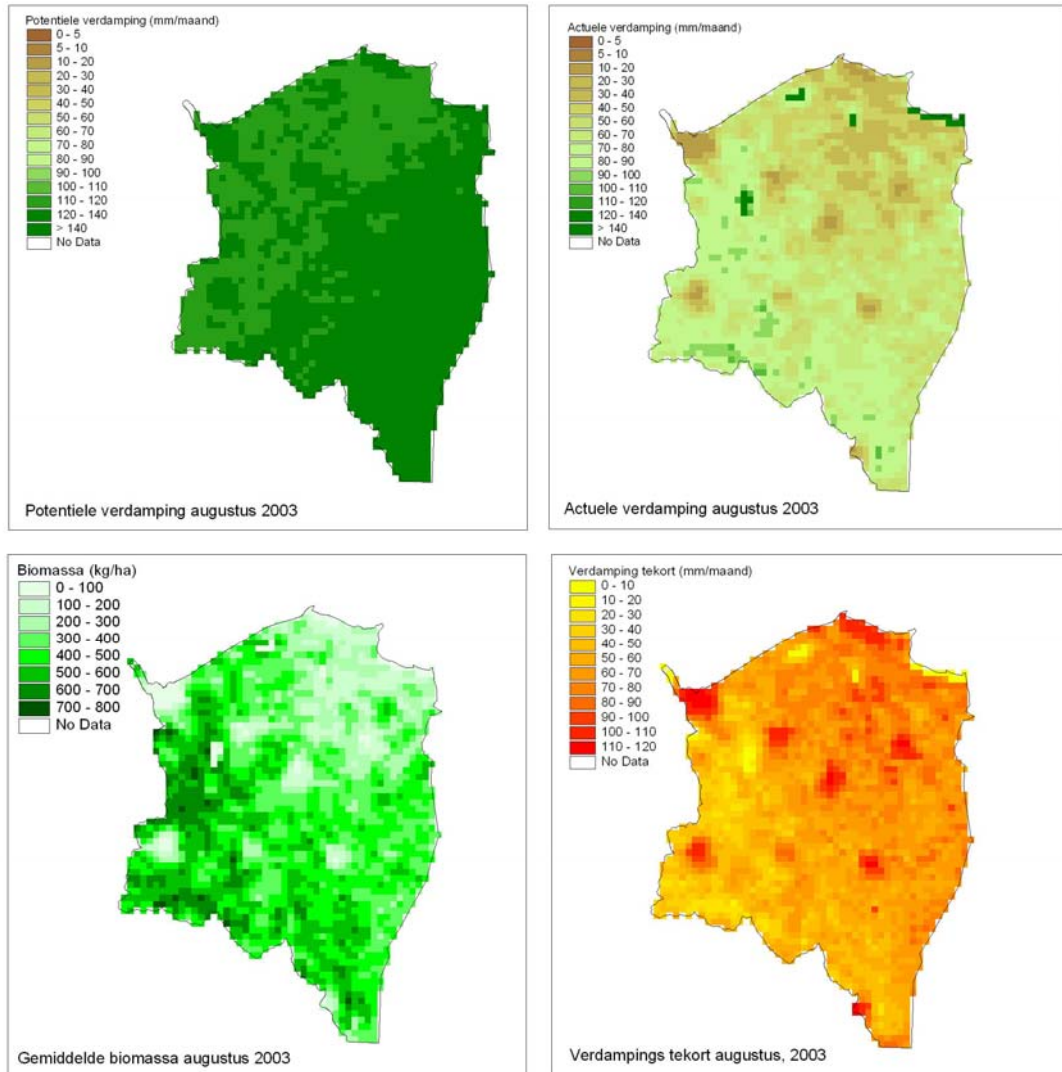
Figuur 16. Verdamping en gewasgroei in mei 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale droge stof.



Figuur 17. Verdamping en gewasgroei in juni 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale droge stof.



Figuur 18. Verdamping en gewasgroei in juli 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale droge stof.



Figuur 19. Verdamping en gewasgroei in augustus 2003 zoals bepaald met de NOAA SEBAL analyse. Biomassa is de groei van de totale droge stof.

4 Referentiesituatie

4.1 Validatie en kalibratie

De gegevens zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk zijn toegepast in de FutureView methode en een validatie en kalibratie proces zijn uitgevoerd. Als eerste is een ruwe data betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd, waarbij zogenaamde uitschieters vervangen zijn door realistische gegevens gebaseerd op expert-judgement en gegevens van naast liggende gebieden. Hierbij zijn de volgende kleine correcties doorgevoerd die voor een gedeelte zijn voortgekomen door onnauwkeurigheden in de basis gegevens:

- per rekeneenheid is de kwel nooit meer dan 1 mm d^{-1}
- per rekeneenheid is de wegzijging nooit meer dan 1 mm d^{-1}
- de drooglegging is altijd groter dan 80 cm
- de drainageweerstand voor het primaire systeem is maximaal 2000 d
- de drainageweerstand voor het secundaire systeem is maximaal 1000 d
- de drainageweerstand voor het tertiaire systeem is maximaal 500 d.

Hierna is gekeken of de grondwaterstand zoals afgeleid uit de grondwatertrappen van de bodemkaart overeenkomt met de gesimuleerde en of de remote sensing verdamping gelijk is met de gesimuleerde verdamping. Aan de hand hiervan is een kalibratie uitgevoerd waarbij de volgende gegevens zijn aangepast:

- grondwaterstand: drainageweerstand
- potentiële verdamping: gewas factor
- actuele verdamping: wortelonttrekkingfunctie.

4.2 Grondwaterstanden

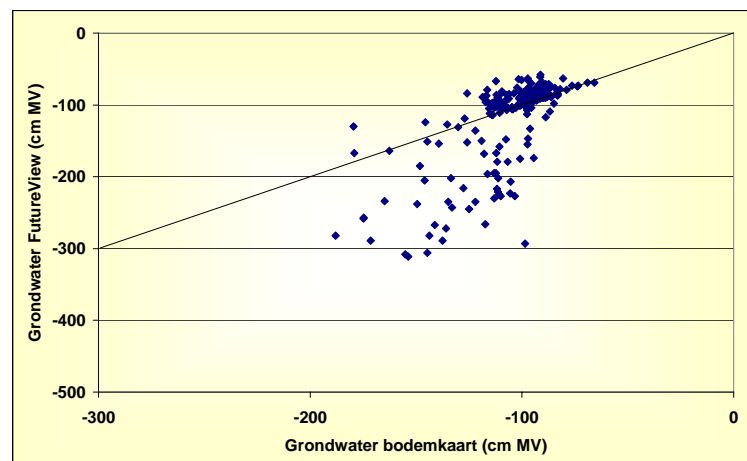
Als eerste is het model gevalideerd door de berekende grondwaterstanden te vergelijken met waarnemingen. Aangezien er geen gemeten grondwaterstanden voor handen waren is gebruik gemaakt van de bodemkaart, waar ook grondwatertrappen in zijn aangegeven. Een grondwatertrappenkaart geeft in klassen (de zogenaamde grondwatertrappen) aan hoe diep het grondwater zit ten opzichte van het maaiveld. Hierbij wordt uitgegaan van de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) - die vooral in de winter en het vroege voorjaar voorkomen - en van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) - die meestal in de nazomer voorkomt en de GVG (de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand).

Aan de hand van een omzettingstabel (Tabel 5) is de grondwatertrappenkaart vervolgens omgezet naar kwantitatieve grondwaterdiepten, waarbij het gemiddelde van de GLG en de GVG is genomen ter vergelijking met de model resultaten. Gezien de droge situatie die zich in 2003 voordeed is dit waarschijnlijk de beste benadering voor het vergelijk met de gesimuleerde grondwaterstand in 2003. Figuur 20 laat zien dat de "gemeten" grondwaterstand goed overeenkomt met de gesimuleerde gemiddelde grondwaterstanden in 2003. Uitzondering hierop zijn de diepere grondwaterstanden die

vooral in het Drentse Aa watersysteem voorkomen. Hier worden diepere grondwaterstanden gesimuleerd dan volgens de "metingen". Dit is te verklaren doordat de omzettingstabel (Tabel 5) een maximum heeft voor de drogere grondwatertrappen terwijl in werkelijkheid waarden als > 180 cm en > 140 cm gelden.

Tabel 5. Omzetting Gt bodemkaart 1:50.000 naar GHG, GLG en GVG. (Stowa, 2003)

GTkaart	GHG (cm -MV)	GLG (cm -MV)	GVG (cm -MV)
I	-5	38	8
II	7	66	24
II*	32	67	45
III	17	103	39
III*	32	102	51
IV	56	104	72
V	17	135	45
V*	32	142	59
VI	61	155	85
VII	101	190	126
VII*, VIII	185	281	213



Figuur 20. Grondwaterstanden gesimuleerd en volgens de grondwatertrappen van de bodemkaart.

4.3 Verdamping

Het gebruik van satellietwaarnemingen voor het kalibreren en valideren van het model heeft twee grote voordelen. Ten eerste zijn deze gegevens beschikbaar voor historische jaren op een hoge resolutie. Een tweede voordeel ten opzichte van valideren op debieten is dat de verdamping meer zegt over de werkelijk optredende processen. Debieten vormen een cumulatieve integrale meting van de talloze hydrologische processen die in een gebied optreden. Met andere woorden, het is makkelijker om op debieten te valideren, omdat procesfouten in een deelproces of een deelgebied simpelweg

kunnen worden gecompenseerd door een ander deelproces of deelgebied. Bij verdamping is deze vrijheid veel minder aanwezig.

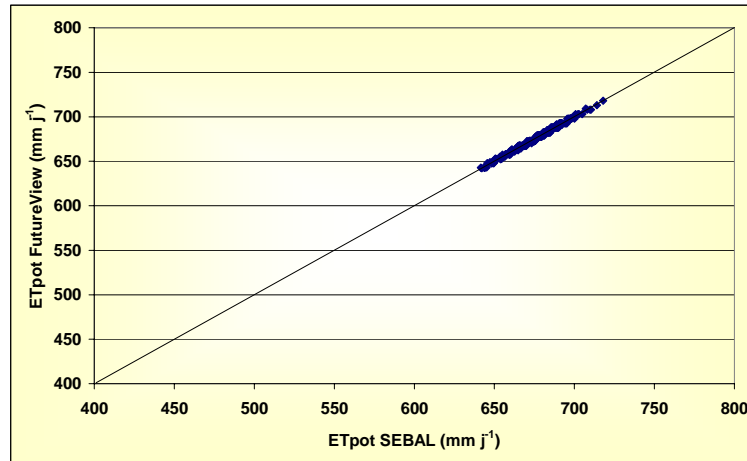
In Figuur 21 is te zien dat de potentiële verdamping per rekeneenheid uit SEBAL en FutureView gelijk zijn. Dit is een gevolg van het kalibreren van de gewasfactor K_c waardoor de werkelijk voorkomende gewaseigenschappen, zoals gemeten met SEBAL, ook in het model worden gebruikt.

Tenslotte is gekeken naar de actuele verdamping (Figuur 22). Het blijkt dat de gesimuleerde verdamping voor een aantal rekeneenheden en watersysteemgebieden (Tabel 6) enigszins afwijkt van de SEBAL waarden. Met name voor Westerwolde en Veenkoloniën berekent FutureView wat hogere waarden dan SEBAL. Een aantal verklaringen zijn hiervoor aan te geven. Ten eerste houdt het model geen rekening met oppervlakten die bebouwd zijn, terwijl SEBAL de bebouwde gebieden wel waarneemt. Ten tweede gaat FutureView ervan uit dat er zich slechts één gewas in een rekeneenheid bevindt, maar er in werkelijkheid meerdere gewassen zijn. Tenslotte zijn de SEBAL waarden bepaald op één wekelijks moment en zijn deze moment opname geïnterpoleerd aan de hand van meteorologische waarnemingen.

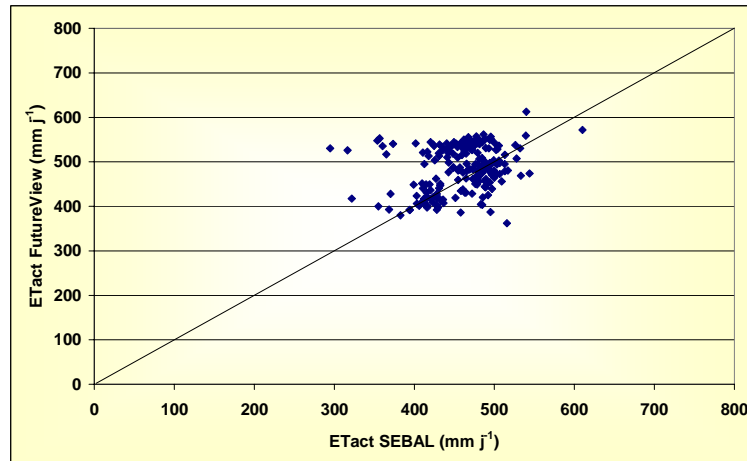
Gezien bovenstaande argumenten is een één-op-één relatie niet te verwachten. De vergelijking tussen SEBAL en FutureView is echter voldoende goed om ervan uit te gaan dat FutureView de werkelijkheid goed beschrijft en gebruikt kan worden voor scenarioanalyses.

Tabel 6. Actuele verdamping voor de SEBAL en de FutureView methode voor de referentie situatie (2003) per watersysteemgebied.

	SEBAL (mm)	FutureView (mm)	Vershil (%)
Drentse Aa	490	452	-8
Duurswold	449	475	6
Hunze	470	489	4
Oldambt	424	427	1
Westerwolde	446	514	15
Veenkoloniën	477	520	9
Gemiddeld	460	481	5



Figuur 21. Potentiële verdamping volgens Remote Sensing en FutureView.



Figuur 22. Actuele verdamping volgens Remote Sensing en FutureView voor de 202 rekeneenheden.

5 Analyse wateraanvoer

5.1 Overzicht

Met behulp van de FutureView methode en de validatie en kalibratie zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk zijn vervolgens de volgende scenario's doorgerekend:

- Evaluatie 2003: werkelijke aanvoer (referentiesituatie)
- Evaluatie 2003: geen wateraanvoer
- Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003
- Evaluatie 2050: wateropgave droogte

De referentiesituatie beschrijft de geschematiseerde situatie zoals deze in het droge jaar 2003 zich voordeed. Zoals in elke modelstudie is deze beschrijving een vereenvoudiging van de werkelijkheid waarbij de belangrijkste schematisering in de FutureView benadering is: binnen een rekeneenheid worden omstandigheden homogeen verondersteld, een complete hydraulische analyse ontbreekt en wateraanvoer via sloten en kanalen is geen beperkende factor. Verder is er een bewuste keuze gemaakt om voor de analyses slechts gebruik te maken van één meteorologisch station, Eelde, om zodoende de wateropgave droogte generiek te kunnen kwantificeren.

Het tweede scenario, geen wateraanvoer, heeft als doel om te bepalen wat de schade voor de landbouw zou zijn indien er in 2003 geen wateraanvoer zou hebben plaatsgevonden. Uiteraard is dit een hypothetisch scenario, maar zeker van belang om in te schatten of het economisch nut van wateraanvoer ten opzicht van de kosten tegen elkaar opweegt.

Het derde scenario gaat uit van een veranderd klimaat, het NBW middenscenario, zonder dat de wateraanvoer verandert. De belangrijkste veranderingen zijn dus dat er iets meer neerslag zal vallen met een grotere intensiteit en aan de andere kant dat de verdamping zal toenemen.

Het laatste scenario gaat tenslotte in op de vraag hoeveel water extra zou moeten worden aangevoerd als gevolg van klimaatverandering indien de landbouwopbrengst identiek moet blijven als in 2003. Dit is in deze studie gedefinieerd als de wateropgave droogte.

5.2 Evaluatie 2003 en effect wateraanvoer

Het FutureView model zoals besproken in het voorgaande hoofdstuk voor het jaar 2003 vormt de referentiesituatie om de andere drie scenario's mee te vergelijken. Gedetailleerde resultaten voor het gehele gebied en voor de zes watersysteemgebieden zijn te vinden in de bijlage. Bij deze tabel moet rekening gehouden worden dat de resultaten van de economische analyse van de gewasopbrengsten meer indicatief dan absoluut gezien moeten worden, aangezien de studie niet specifiek was opgezet voor een economische analyse.

Uit de resultaten blijkt dat er voor het jaar 2003 een verdampingstekort is opgetreden, wat zich vertaalt in gewasschade en een lagere opbrengst. Totaal voor het gehele studiegebied infiltreert 136 miljoen m³ wat neerkomt op gemiddeld 85 mm. Er is echter een groot verschil per watersysteem welk oppervlakte wateraanvoer gebied is. Voor Drentse Aa is 0% aangemerkt als wateraanvoergebied, terwijl dit voor Duurswold en Oldambt 100% is, met de opmerking dat vooral voor de laatste twee gebieden het relatief moeilijk is om als gevolg van de zwaardere gronden ook werkelijk voldoende water te infiltreren.

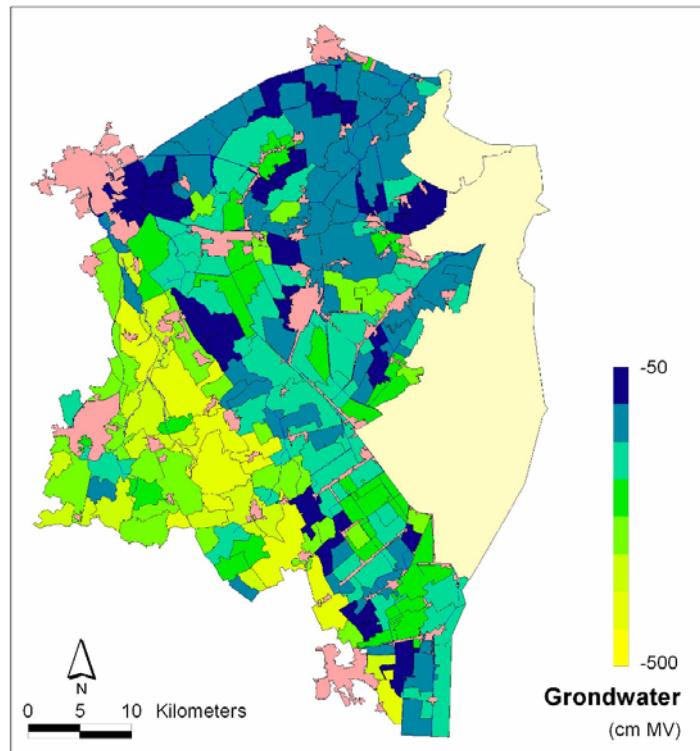
De FutureView methode heeft als groot voordeel dat resultaten ook ruimtelijk inzichtelijk gemaakt kunnen worden. Als voorbeeld is in Figuur 23 de gemiddelde gesimuleerde grondwaterstand per rekeneenheid weergegeven. Duidelijk is het patroon te herkennen van lagere grondwaterstanden in de hogere delen in het zuid-westen. Ook zijn er lokaal verschillen te zien, die het gevolg zijn van een veelvoud van eigenschappen zoals bodem, drooglegging, drainagetoestand, landgebruik, etc. Figuur 24 laat de infiltratie zien voor alle rekeneenheden. De wateraanvoergebieden zijn duidelijk te onderscheiden en duidelijk is ook dat de infiltratie voor de Veenkoloniën en Westerwolde hoger zijn dan voor de andere gebieden.

De relatieve gewasopbrengst (een waarde tussen 0 en 1, waarbij 0 staat voor geen productie en 1 staat voor een opbrengst gelijk aan de potentiële) is een integrale maat voor hoe de volledige water-bodem-gewas processen verlopen en is ook gebruikt om de opbrengst in kg ha⁻¹ uit te rekenen. In Figuur 25 is deze relatieve gewasopbrengst te zien. De ruimtelijke spreiding heeft een correlatie met de infiltratie, maar laat bovendien ook nog andere effecten zien zoals gewastype en bodemeigenschappen. Duidelijk is wel dat de wateraanvoergebieden, en dan met name de Veenkoloniën, gemiddeld een hogere relatieve gewasopbrengst hebben dan de Drentse Aa.

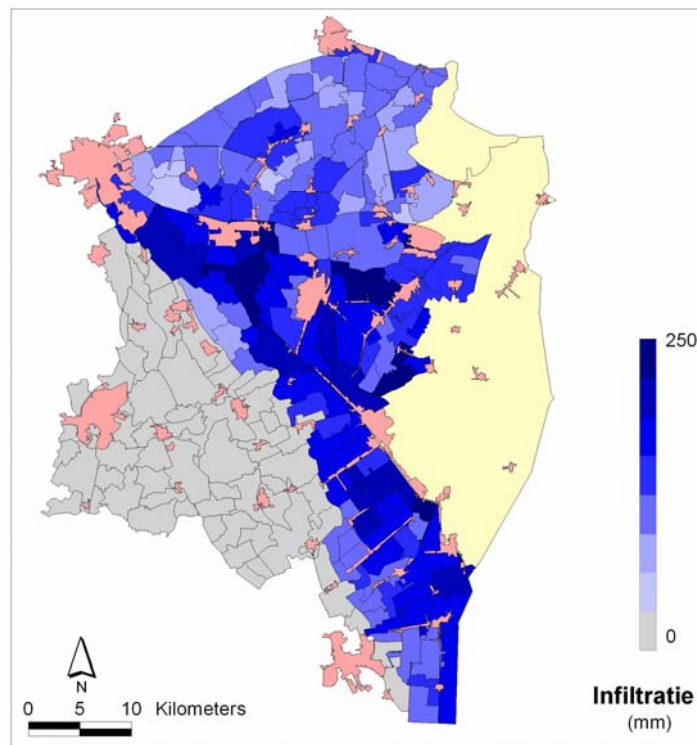
Met behulp van het gebouwde FutureView model is eenvoudig te bepalen wat het effect zou zijn indien er geen wateraanvoer in 2003 zou hebben plaatsgevonden. Tabel 13 in de bijlage laat in detail zien wat dan het verdampingstekort zou zijn en hoe dit doorwerkt op de schade en de opbrengst. In Tabel 7 zijn de belangrijkste resultaten uit Tabel 12 en Tabel 13 naast elkaar gezet om zodoende een duidelijk beeld te krijgen van de positieve effecten van wateraanvoer op de landbouwproductie. Het is duidelijk dat het stoppen met wateraanvoer de droogteschade aanzienlijk kan doen toenemen en uitgedrukt in euro's kan dit zelfs oplopen tot 129 € ha⁻¹.

Tabel 7. Effect van wateraanvoer voor het jaar 2003 per watersysteemgebied.

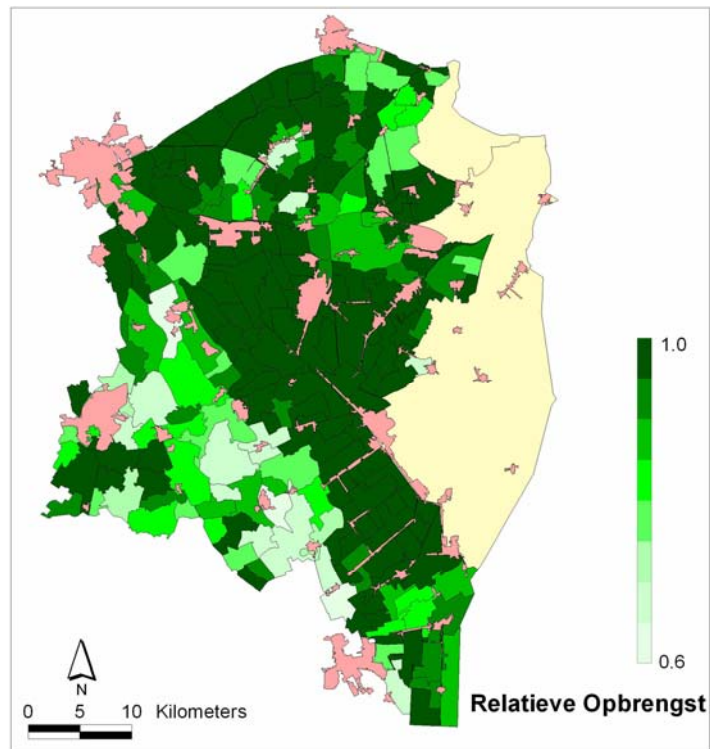
	Referentie		Geen wateraanvoer		Verschil	
	Schade %	Opbrengst € ha ⁻¹	Schade %	Opbrengst € ha ⁻¹	Schade %	Opbrengst € ha ⁻¹
Drentse Aa	15	796	15	796	0	0
Duurswold	7	1406	9	1373	28	-33
Hunze	10	1577	11	1553	12	-23
Oldambt	10	1416	13	1362	33	-54
Westerwolde	11	2366	15	2237	41	-129
Veenkoloniën	4	2414	8	2336	84	-78
Totaal	9	1633	12	1589	25	-44



Figuur 23. Gemiddelde grondwaterstand voor de referentiesituatie.



Figuur 24. Infiltratie voor de referentiesituatie.



Figuur 25. Gemiddelde gewasopbrengst voor de referentiesituatie.

5.3 Evaluatie 2050

5.3.1 Klimaatverandering

De wateropgave droogte is in deze studie gedefinieerd als "de hoeveelheid water die **extra** aangevoerd moet worden in 2050 om de effecten van klimaatverandering te compenseren". 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 variatie 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).

De eindrapportage van Fase 1 van de Droogtestudie Nederland (2003) laat zien dat onder invloed van de klimaatveranderingen de vochttekorten in de bodem toenemen. In een gemiddeld jaar wordt in het middenscenario het watertekort 19% groter en in het hoge scenario 36%. In een extreem droog jaar zal dat respectievelijk 8% en 17% zijn.

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
- +4% 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 de methode die ook is toegepast in de eerste fase van deze studie:

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

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})

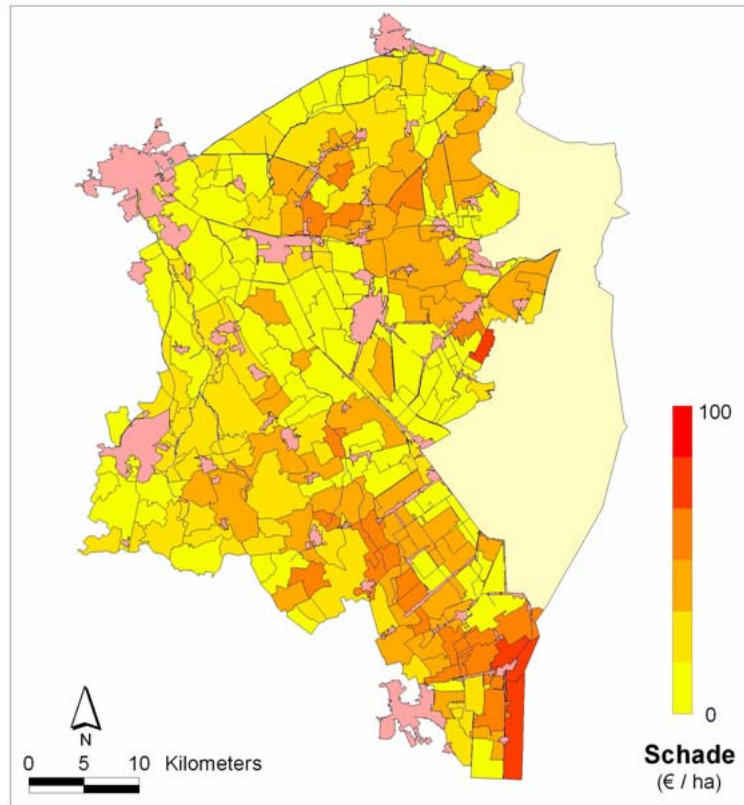
a = constante

Samenvattend is de evaluatie 2050 uitgevoerd door met FutureView exact dezelfde methoden als de de referentiesituatie te gebruiken, waarbij de neerslag en de verdamping wordt aangehouden volgens het klimaatscenario van 2050 (middenscenario). De evaluatie voor 2050 bestaat uit twee scenario's: (i) wateraanvoer gelijk aan 2050 en (ii) landbouwproductie gelijk aan 2003. Dit laatste scenario levert de zogenoemde "wateropgave droogte" op.

5.3.2 Evaluatie 2050: wateraanvoer 2003

De resultaten van het scenario 2050 waarbij de wateraanvoer gelijk is aan 2003 is te zien in Tabel 14 (in bijlage). Aangezien FutureView de benodigde infiltratie zelf bepaald, was het noodzakelijk om iteratief de infiltratieweerstand per rekeneenheid aan te passen om zodoende de 2050 berekende infiltratie gelijk te krijgen aan de 2003 situatie. Hierdoor zijn er afrondingsverschillen te zien en is de infiltratie in Tabel 12 soms net iets anders dan in Tabel 14.

Het effect van klimaatverandering op de actuele verdamping is dat deze in 2050 iets groter is dan in 2003, door een verhoging van de potentiële verdamping. Met andere woorden, de atmosfeer trekt harder aan de planten, waardoor deze tot het uiterste gaan om meer water uit de bodem te trekken. Het verdampingstekort neemt echter toe en hierdoor neemt ook de droogteschade toe en de opbrengst af. Gemiddeld voor het gehele studiegebied bedraagt deze schade € 20 ha^{-1} , maar verschilt per watersysteem van € 15 tot bijna € 50 ha^{-1} . Binnen één watersysteem kunnen deze verschillen nog wat groter zijn, afhankelijk van bodem en gewas (Figuur 26).



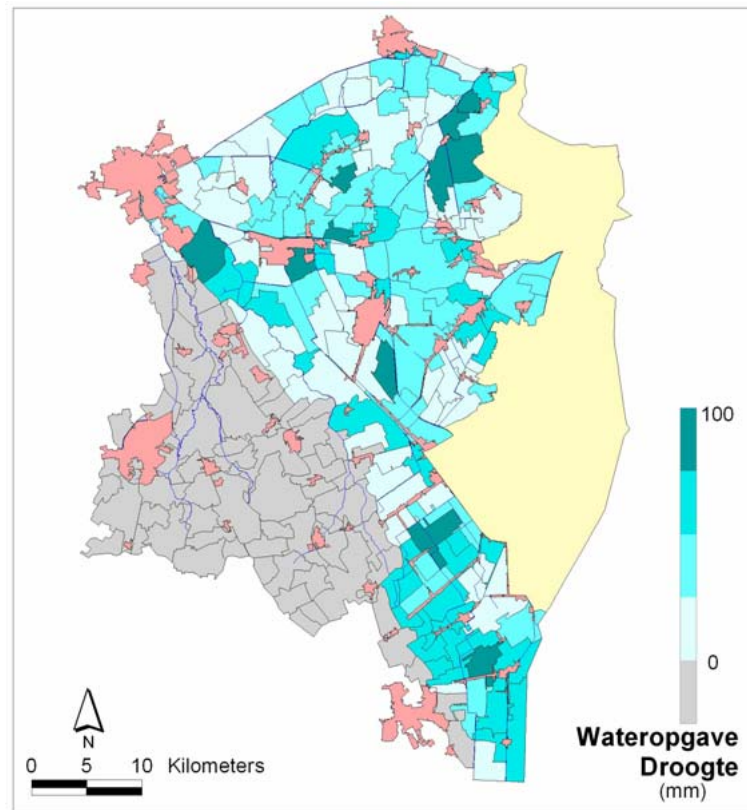
Figuur 26. Landbouwschade als gevolg van klimaatverandering.

5.3.3 Evaluatie 2050: wateropgave droogte

Het laatste scenario waarbij ervan wordt uitgegaan dat de gewasopbrengst in 2050 gelijk moet zijn aan 2003 heeft ook een iteratieve benadering nodig. Alleen door meer water te infiltreren kan de opbrengst in 2050 op peil gehouden worden en dit is in FutureView uitgevoerd door iteratief de infiltratieweerstand te verhogen. Door afrondingsfouten zijn de opbrengsten in Tabel 15 daarom niet gelijk aan die in Tabel 12 (zie bijlage). Er is echter een andere component waardoor deze niet gelijk zijn; in de gebieden buiten de wateraanvoer bestaat er geen mogelijkheid om te compenseren voor de effecten van klimaatverandering. Zo zijn voor het Drentse Aa gebied de resultaten van het scenario "wateraanvoer 2003" exact hetzelfde als "opbrengst 2003".

In Tabel 8 is de uiteindelijke wateropgave droogte weergegeven die, zoals eerder genoemd, gedefinieerd is als "de hoeveelheid water die **extra** aangevoerd moet worden in 2050 om de effecten van klimaatverandering te compenseren". Voor het gehele studiegebied bedraagt deze wateropgave droogte 23 miljoen m³ wat neerkomt op 14 mm. Niet in het hele studiegebied vindt wateraanvoer plaats en in Tabel 9 is te zien dat de wateropgave voor de gebieden waar wel wateraanvoer plaatsvindt tussen de 15 en 26 mm bedraagt.

In Figuur 27 is de ruimtelijke spreiding van de wateropgave weergegeven die duidelijk aangeeft dat deze bodem en gewas afhankelijk is. Tenslotte zijn in Tabel 10 en Tabel 11 de belangrijkste resultaten op een rijtje gezet. Deze resultaten zijn een compilatie van Tabel 12 tot en met Tabel 15.



Figuur 27. Wateropgave droogte per rekeneenheid.

Tabel 8. Infiltratie voor de referentiesituatie en de 2050 situatie voor het bepalen van de wateropgave droogte.

	Referentie		2050		Wateropgave	
	mm	milj. m ³	mm	milj. m ³	mm	milj. m ³
Drentse Aa	0	0	0	0	0	0
Duurswold	71	15	85	19	15	3
Hunze	89	36	100	40	11	5
Oldambt	73	15	99	20	26	5
Westerwolde	129	16	153	19	24	3
Veenkoloniën	151	53	170	60	19	7
Totaal	85	136	99	158	14	23

Tabel 9. Wateropgave droogte voor alleen de wateraanvoer gebieden. "Oppervlak" geeft aan welke percentage van het betreffende gebied in de wateraanvoergebieden ligt.

	Oppervlak	Wateropgave	
	%	mm	milj. m ³
Drentse Aa	0	0	0
Duurswold	100	15	3
Hunze	52	21	5
Oldambt	100	26	5
Westerwolde	95	25	3
Veenkoloniën	89	21	7
Totaal	67	21	23

Tabel 10. Samenvatting van de belangrijkste resultaten als totalen voor het gehele studiegebied.

	2003: Referentie	2003: Geen aanvoer	2050: aanvoer 2003	2050: opbrengst referentie
Infiltratie (mm j ⁻¹)	85	0	84	99
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	136	0	135	158
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-136	-1	22 ¹
Schade (%)	9	12	11	10
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	1633	1589	1613	1628
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-44	-20	-6 ²

Note:

¹ Dit is de wateropgave zoals gedefinieerd in deze studie

² Niet nul omdat niet gehele gebied wateraanvoer heeft

Tabel 11. Samenvatting van de belangrijkste resultaten als totalen voor de zes watersysteemgebieden afzonderlijk.

	2003: Referentie	2003: Geen aanvoer	2050: aanvoer 2003	2050: opbrengst referentie
Drentse Aa				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	0	0	0	0
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	0	0	0	0
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	0	0	0
Schade (%)	15	15	17	17
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	796	796	781	781
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	0	-15	-15
Duurswold				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	71	0	70	85
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	15	0	15	19
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-15	0	4
Schade (%)	7	9	8	7
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	1406	1373	1390	1404
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-33	-16	-2
Hunze				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	89	0	88	100
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	36	0	36	40
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-36	0	4
Schade (%)	10	11	11	10
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	1577	1553	1560	1563
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-23	-16	-13
Oldambt				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	73	0	72	99
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	15	0	15	20
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-15	0	5
Schade (%)	10	13	12	9
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	1416	1362	1391	1427
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-54	-25	11
Westerwolde				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	129	0	129	153
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	16	0	16	19
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-16	0	3
Schade (%)	11	15	12	11
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	2366	2237	2319	2362
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-129	-46	-4

Tabel 11 (vervolg).

	<i>2003: Referentie</i>	<i>2003: Geen aanvoer</i>	<i>2050: aanvoer 2003</i>	<i>2050: opbrengst referentie</i>
Veenkoloniën				
Infiltratie (mm j ⁻¹)	151	0	151	170
Infiltratie (miljoen m ³ j ⁻¹)	53	0	53	60
Infiltratie (t.o.v. referentie, milj. m ³ j ⁻¹)	-	-53	0	7
Schade (%)	4	8	5	4
Opbrengst (€ ha ⁻¹)	2414	2336	2395	2412
Opbrengst (t.o.v. referentie, € ha ⁻¹)	-	-78	-19	-2

6 Conclusies

6.1 Methode

De toegepaste methode in deze studie berust op vier onderdelen: (i) aanwezige gegevens, (ii) remote sensing, (iii) FutureView en (iv) klimaatscenario's. Alleen de combinatie van deze vier maakt het mogelijk om de analyses uit te voeren en de nauwkeurigheid van de methoden is bepalend voor het eindresultaat. Voor wat betreft de FutureView en de remote sensing methoden zijn deze nauwkeurigheden hoog, waarbij opgemerkt dient te worden dat FutureView vooral gericht is op hydrologische processen en minder op hydraulische aspecten van wateraanvoer. De nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens kan, met name voor de STONE database, nogal variëren. Door gebruik te maken van kalibratie aan de hand van de remote sensing verdamping en grondwaterstandwaarnemingen zijn deze onnauwkeurigheden verkleind.

De grootste onzekerheid zit echter in de klimaatscenario's. In deze studie is gebruik gemaakt van het NBW middenscenario, maar het gebruik van het lage of hoge scenario zou ongetwijfeld tot andere resultaten hebben geleid. Interessant is om alvast vooruit te blikken op de nieuwe scenario's die het KNMI aan het begin van 2006 zal presenteren. Door vernieuwde inzichten, gebaseerd op waarnemingen over de laatste 10 jaar, model studies en wetenschappelijk studies, zullen de volgende vier scenario's worden gepresenteerd (KNMI nieuwsbrief, mei 2005):

- K-scenario: "midden ΔT + gewijzigde circulatie";
- N-scenario: "hoge ΔT + gewijzigde circulatie" (voor de zomer vergelijkbaar met het huidige "droge" scenario);
- M-scenario: "midden ΔT + huidige circulatie" (vergelijkbaar met het huidige "centrale" scenario);
- I-scenario: "hoge ΔT + huidige circulatie" (vergelijkbaar met het huidige "hoge" scenario);

In deze vier scenario's betekent een gewijzigde circulatie dat de winters natter worden, als gevolg van meer westenwind, en de zomers droger, door minder westenwind. Hoewel er geen waarschijnlijkheid aan de scenario's gegeven kan worden, is het wel duidelijk dat het huidige NBW middenscenario (dat M-scenario heet volgens de nieuwe indeling) het minst dramatisch is. Met andere woorden, in 7 jaar tijd zijn de inzichten veranderd en zijn de verwachtingen voor de toekomst bijgesteld naar meer veranderingen.

Uitermate interessant zou zijn om te analyseren in hoeverre de spreiding van deze vier scenario's zal doorwerken in de wateropgave droogte en de gerelateerde verandering in gewasproductie.

6.2 Analyse huidige wateraanvoer

De analyse van de huidige wateraanvoer laat zien dat voor het gehele studiegebied 136 miljoen m³ water infiltreert en dus moet worden aangevoerd. In de eerste fase van de studie bleek dat voor het Westerwoldse gebied 37 miljoen m³ infiltreert, zodat het totaal voor het gehele waterschap ongeveer

175 miljoen m³ bedraagt. Uitgaande van de 75% wateraanvoergebied is dit dus gemiddeld ongeveer 110 mm.

Indien deze hoeveelheid niet zou worden aangevoerd zou de gemiddelde schade over het gehele studiegebied € 44 ha⁻¹ bedragen (omgerekend naar alleen de wateraanvoergebieden is dit € 65 ha⁻¹) en kan oplopen tot bijna € 130 ha⁻¹. Aan de andere kant zijn er ook kosten gemoeid met het aanvoeren van water. Deze kosten zijn aanzienlijk in termen van extra beheerskosten en daardoor dus ook voor de tarieven (waterschapsomslag) die ingelanden moeten betalen. Het tarief voor ongebouwd klasse 2 (zichtbare afwatering zonder wateraanvoer) bedraagt € 49,40 ha⁻¹ terwijl het tarief ongebouwd klasse 3 (zichtbare afwatering met wateraanvoer) € 80,81 ha⁻¹ bedraagt. Dit betekent dat ingelanden ongeveer € 30 ha⁻¹ betalen voor de aanvoer van water.

Een simpele berekening, uitgaande van deze waterschapsomslag, laat zien dat de totale beheerskosten voor deze wateraanvoer voor het waterschap ongeveer € 5.000.000 bedragen (213.000 ha beheersgebied * 75% wateraanvoergebied * € 30 per ha). Gezien de totale uitgaven voor waterkwantiteit (ongeveer € 30.000.000) betekent dit dat ruim 15% van de kosten aan wateraanvoer wordt besteed.

Samenvattend kan gezegd worden dat de kosten voor ingelanden voor wateraanvoer (€ 30 ha⁻¹) positief afwegen ten opzichte van de extra opbrengst (€ 65 ha⁻¹). Deze bedragen zijn gebaseerd op gemiddelden en een relatief eenvoudige economische analyse voor wat betreft de extra opbrengst. Het zou interessant zijn om hier gedetailleerd naar te kijken, waarbij een uitsplitsing per gewas wordt gemaakt en de analyses zich uitstrekken over meerdere jaren.

6.3 Analyse 2050

De wateropgave 2050 laat zien dat deze 23 miljoen m³ bedraagt en indien we hier de wateropgave bij optellen van de eerste fase van deze studie voor het Westervoldse gebied (7 miljoen m³) bedraagt de totale wateropgave 30 miljoen m³. Dit is dus de hoeveelheid water die in 2050 **extra** zou moeten worden aangevoerd om de huidige landbouwproductie te behouden.

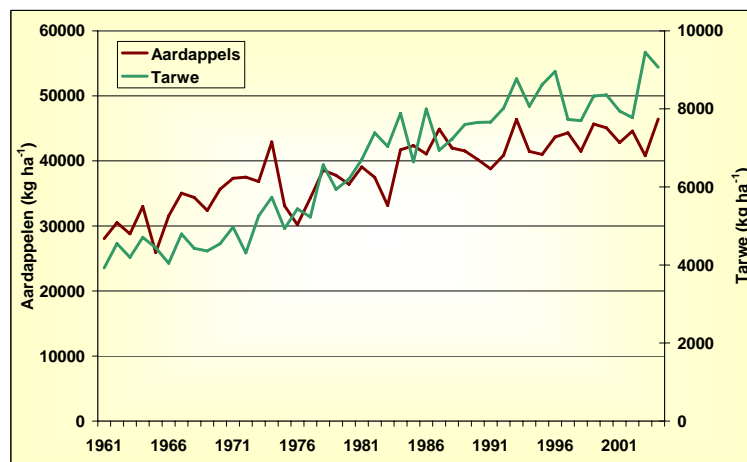
Indien deze wateropgave droogte niet wordt meegenomen in het waterbeheer en dus dezelfde hoeveelheid als in 2003 beschikbaar blijft, zal hierdoor gemiddeld € 20 ha⁻¹ extra schade optreden als gevolg van klimaatverandering.

Zoals aangegeven in paragraaf 6.1 is één van de onzekere factoren het gebruikte klimaatscenario. Het zou daarom wenselijk zijn om het effect van andere scenario's ook te analyseren om zodoende een idee te krijgen van de bandbreedte in verwachtingen.

Een tweetal andere aspecten zijn in het opstellen van de wateropgave niet meegenomen. Ten eerste zal de gewasproductie als gevolg van het totale pakket van verbetering in landbouwmethoden en veredeling waarschijnlijk toenemen. In Figuur 28 is te zien wat voor Nederland de opbrengst voor aardappels en tarwe was sinds 1961. Alhoewel de laatste 10 jaar er niet veel verandering is opgetreden, is de algehele trend over ruim 40 jaar een toename met 65% voor aardappels en voor tarwe 130%.

Een tweede aspect waar geen rekening mee is gehouden is het effect van verhoogd CO₂ op plantengroei. Het is bekend en waargenomen dat verdamping van bladeren en de openingstoestand van huidmondjes vermindert als de CO₂ concentratie in de lucht toeneemt. Een zeer globale schatting geeft aan dat een verdampingsreductie van 5% per 100 ppm CO₂ stijging te verwachten is (Witte, 2005). Een stijging van de CO₂ concentratie van 350 ppm nu naar 550 ppm in 2050 betekent dus een verdampingsreductie van 10%. Aan de andere kant zullen hogere temperaturen leiden tot een verhoging van de potentiële verdamping, die volgens het NBW middenscenario 5% zal bedragen. Het netto effect zou dus een kleine verdampingsreductie kunnen opleveren en dus een lagere wateropgave droogte. Samenvattend zijn de directe effecten van temperatuurstijging en CO₂-toename met grote onzekerheid omgeven en hebben een tegengestelde uitwerking.

Concluderend kan dus gesteld worden dat de wateropgave, uitgaande van toegepaste scenario's zonder rekening te houden met onzekerheidsmarges, 30 miljoen m³ bedraagt voor het gehele beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's.



Figuur 28. Aardappel en tarwe opbrengst over de afgelopen 40 jaar.

7 Literatuur

- 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. Immerzeel. 2005. Regionale analyse droogte: Een analyse van huidige wateraanvoer en wateropgave 2050. Waterschap Hunze en Aa's. Rapport FutureWater, Wageningen.
- Droogers, P., R. Loeve en B. van den Hurk. 2004. De (on)zekerheid van klimaatverandering. H2O 19: 85-88.
- 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.
- 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.
- KNMI. 2005. De nieuwe KNMI klimaatscenario's. Nieuwsbrief nr. 1, mei 2005.
- 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.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-report 773.
- Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom, en A.H.W. Beusen. 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. RIZA rapport 2001.017, Lelystad, Nederland.
- LEI. 2005. Landbouw Economisch Instituut. <http://www.lei.dlo.nl/>
- STOWA. 2003. Waternoodinstrumentarium, handleiding v1.1.
- 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.

WB21. 2000. Waterbeleid voor de 21^e eeuw. Advies van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw.

Witte, J.P.M., B. Kruijt, B. en Maas, C. 2005. Wordt Nederland natter? Effecten van CO₂ op verdamping. Kiwa rapport: KWR 05.042.

Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stoke. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153.

Bijlagen: Gedetailleerde resultaten per watersysteem

Tabel 12. Resultaten FutureView voor 2003 referentie.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Drentse Aa	693	452	224	0	15	796
Duurswold	693	475	198	71	7	1406
Hunze	693	489	193	89	10	1577
Oldambt	693	427	230	73	10	1416
Westerwolde	693	514	187	129	11	2366
Veenkoloniën	693	520	161	151	4	2414
Totaal	693	481	197	85	9	1633
Zomer						
Drentse Aa	348	373	191	0		
Duurswold	348	403	159	68		
Hunze	348	428	143	82		
Oldambt	348	379	168	72		
Westerwolde	348	477	112	121		
Veenkoloniën	348	486	84	147		
Totaal	348	425	142	81		
juli-aug						
Drentse Aa	78	115	109	0		
Duurswold	78	150	72	28		
Hunze	78	156	69	35		
Oldambt	78	141	74	33		
Westerwolde	78	180	53	51		
Veenkoloniën	78	199	26	66		
Totaal	78	157	67	35		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Drentse Aa	207,000,000	135,000,000	67,000,000	0	15	24,000,000
Duurswold	152,000,000	104,000,000	44,000,000	15,000,000	7	31,000,000
Hunze	280,000,000	198,000,000	78,000,000	36,000,000	10	64,000,000
Oldambt	141,000,000	87,000,000	47,000,000	15,000,000	10	29,000,000
Westerwolde	87,000,000	65,000,000	23,000,000	16,000,000	11	30,000,000
Veenkoloniën	244,000,000	183,000,000	57,000,000	53,000,000	4	85,000,000
Totaal	1,111,000,000	771,000,000	315,000,000	136,000,000	9	262,000,000
Zomer						
Drentse Aa	104,000,000	111,000,000	57,000,000	0		
Duurswold	76,000,000	88,000,000	35,000,000	15,000,000		
Hunze	141,000,000	173,000,000	58,000,000	33,000,000		
Oldambt	71,000,000	77,000,000	34,000,000	15,000,000		
Westerwolde	44,000,000	60,000,000	14,000,000	15,000,000		
Veenkoloniën	123,000,000	171,000,000	30,000,000	52,000,000		
Totaal	559,000,000	681,000,000	227,000,000	130,000,000		
juli-aug						
Drentse Aa	23,000,000	34,000,000	32,000,000	0		
Duurswold	17,000,000	33,000,000	16,000,000	6,000,000		
Hunze	32,000,000	63,000,000	28,000,000	14,000,000		
Oldambt	16,000,000	29,000,000	15,000,000	7,000,000		
Westerwolde	10,000,000	23,000,000	7,000,000	6,000,000		
Veenkoloniën	28,000,000	70,000,000	9,000,000	23,000,000		
Totaal	126,000,000	252,000,000	107,000,000	57,000,000		

Tabel 13. Resultaten FutureView voor 2003 geen wateraanvoer.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Drentse Aa	693	452	224	0	15	796
Duurswold	693	467	206	0	9	1373
Hunze	693	483	200	0	11	1553
Oldambt	693	414	243	0	13	1362
Westerwolde	693	493	207	0	15	2237
Veenkoloniën	693	506	175	0	8	2336
Totaal	693	472	206	0	12	1589
Zomer						
Drentse Aa	348	373	191	0		
Duurswold	348	395	167	0		
Hunze	348	421	149	0		
Oldambt	348	366	181	0		
Westerwolde	348	457	133	0		
Veenkoloniën	348	473	98	0		
Totaal	348	416	151	0		
juli-aug						
Drentse Aa	78	115	109	0		
Duurswold	78	143	79	0		
Hunze	78	151	75	0		
Oldambt	78	129	86	0		
Westerwolde	78	162	70	0		
Veenkoloniën	78	187	39	0		
Totaal	78	149	75	0		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Drentse Aa	207,000,000	135,000,000	67,000,000	0	15	24,000,000
Duurswold	152,000,000	103,000,000	45,000,000	0	9	30,000,000
Hunze	280,000,000	195,000,000	81,000,000	0	11	63,000,000
Oldambt	141,000,000	84,000,000	49,000,000	0	13	28,000,000
Westerwolde	87,000,000	62,000,000	26,000,000	0	15	28,000,000
Veenkoloniën	244,000,000	178,000,000	62,000,000	0	8	82,000,000
Totaal	1,111,000,000	757,000,000	330,000,000	0	12	255,000,000
Zomer						
Drentse Aa	104,000,000	111,000,000	57,000,000	0		
Duurswold	76,000,000	87,000,000	37,000,000	0		
Hunze	141,000,000	170,000,000	60,000,000	0		
Oldambt	71,000,000	74,000,000	37,000,000	0		
Westerwolde	44,000,000	57,000,000	17,000,000	0		
Veenkoloniën	123,000,000	166,000,000	34,000,000	0		
Totaal	559,000,000	667,000,000	242,000,000	0		
juli-aug						
Drentse Aa	23,000,000	34,000,000	32,000,000	0		
Duurswold	17,000,000	31,000,000	17,000,000	0		
Hunze	32,000,000	61,000,000	30,000,000	0		
Oldambt	16,000,000	26,000,000	18,000,000	0		
Westerwolde	10,000,000	20,000,000	9,000,000	0		
Veenkoloniën	28,000,000	66,000,000	14,000,000	0		
Totaal	126,000,000	239,000,000	120,000,000	0		

Tabel 14. Resultaten FutureView voor 2050 wateraanvoer gelijk aan 2003.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Drentse Aa	717	461	241	0	17	781
Duurswold	717	488	212	70	8	1390
Hunze	717	503	207	88	11	1560
Oldambt	717	437	246	72	12	1391
Westerwolde	717	525	203	129	12	2319
Veenkoloniën	717	536	172	151	5	2395
Totaal	717	494	211	84	11	1613
Zomer						
Drentse Aa	352	381	207	0		
Duurswold	352	414	172	67		
Hunze	352	440	155	82		
Oldambt	352	388	183	72		
Westerwolde	352	488	127	121		
Veenkoloniën	352	503	92	147		
Totaal	352	436	154	81		
juli-aug						
Drentse Aa	78	114	119	0		
Duurswold	78	152	79	28		
Hunze	78	159	77	35		
Oldambt	78	141	83	33		
Westerwolde	78	180	62	51		
Veenkoloniën	78	204	31	65		
Totaal	78	159	75	35		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Drentse Aa	214,000,000	138,000,000	72,000,000	0	17	23,000,000
Duurswold	157,000,000	107,000,000	46,000,000	15,000,000	8	31,000,000
Hunze	290,000,000	203,000,000	83,000,000	36,000,000	11	63,000,000
Oldambt	146,000,000	89,000,000	50,000,000	15,000,000	12	28,000,000
Westerwolde	90,000,000	66,000,000	26,000,000	16,000,000	12	29,000,000
Veenkoloniën	252,000,000	189,000,000	61,000,000	53,000,000	5	84,000,000
Totaal	1,149,000,000	791,000,000	338,000,000	135,000,000	11	259,000,000
Zomer						
Drentse Aa	105,000,000	114,000,000	62,000,000	0		
Duurswold	77,000,000	91,000,000	38,000,000	15,000,000		
Hunze	142,000,000	178,000,000	63,000,000	33,000,000		
Oldambt	72,000,000	79,000,000	37,000,000	15,000,000		
Westerwolde	44,000,000	61,000,000	16,000,000	15,000,000		
Veenkoloniën	124,000,000	177,000,000	32,000,000	52,000,000		
Totaal	565,000,000	700,000,000	248,000,000	129,000,000		
juli-aug						
Drentse Aa	23,000,000	34,000,000	35,000,000	0		
Duurswold	17,000,000	33,000,000	17,000,000	6,000,000		
Hunze	32,000,000	64,000,000	31,000,000	14,000,000		
Oldambt	16,000,000	29,000,000	17,000,000	7,000,000		
Westerwolde	10,000,000	23,000,000	8,000,000	6,000,000		
Veenkoloniën	28,000,000	72,000,000	11,000,000	23,000,000		
Totaal	126,000,000	255,000,000	119,000,000	56,000,000		

Tabel 15. Resultaten FutureView voor 2050 met opbrengst gelijk aan 2003.

	Neerslag	Verdamping actueel	Verdamping tekort	Infiltratie	Schade	Opbrengst
	mm	mm	mm	mm	%	EUR/ha
Jaar						
Drentse Aa	717	461	241	0	17	781
Duurswold	717	491	209	85	7	1404
Hunze	717	504	205	100	10	1563
Oldambt	717	445	238	99	9	1427
Westerwolde	717	532	196	153	11	2362
Veenkoloniën	717	539	169	170	4	2412
Totaal	717	497	208	99	10	1628
Zomer						
Drentse Aa	352	381	207	0		
Duurswold	352	417	169	82		
Hunze	352	442	154	94		
Oldambt	352	395	175	98		
Westerwolde	352	495	120	145		
Veenkoloniën	352	506	90	167		
Totaal	352	439	152	95		
juli-aug						
Drentse Aa	78	114	119	0		
Duurswold	78	154	77	35		
Hunze	78	160	75	40		
Oldambt	78	149	76	47		
Westerwolde	78	186	57	61		
Veenkoloniën	78	207	28	75		
Totaal	78	162	72	42		
	m ³	m ³	m ³	m ³		EUR
Jaar						
Drentse Aa	214,000,000	138,000,000	72,000,000	0	17	23,000,000
Duurswold	157,000,000	108,000,000	46,000,000	19,000,000	7	31,000,000
Hunze	290,000,000	204,000,000	83,000,000	40,000,000	10	63,000,000
Oldambt	146,000,000	90,000,000	48,000,000	20,000,000	9	29,000,000
Westerwolde	90,000,000	67,000,000	25,000,000	19,000,000	11	30,000,000
Veenkoloniën	252,000,000	190,000,000	60,000,000	60,000,000	4	85,000,000
Totaal	1,149,000,000	796,000,000	333,000,000	158,000,000	10	261,000,000
Zomer						
Drentse Aa	105,000,000	114,000,000	62,000,000	0		
Duurswold	77,000,000	92,000,000	37,000,000	18,000,000		
Hunze	142,000,000	179,000,000	62,000,000	38,000,000		
Oldambt	72,000,000	80,000,000	35,000,000	20,000,000		
Westerwolde	44,000,000	62,000,000	15,000,000	18,000,000		
Veenkoloniën	124,000,000	178,000,000	32,000,000	59,000,000		
Totaal	565,000,000	704,000,000	243,000,000	153,000,000		
juli-aug						
Drentse Aa	23,000,000	34,000,000	35,000,000	0		
Duurswold	17,000,000	34,000,000	17,000,000	8,000,000		
Hunze	32,000,000	65,000,000	30,000,000	16,000,000		
Oldambt	16,000,000	30,000,000	15,000,000	10,000,000		
Westerwolde	10,000,000	23,000,000	7,000,000	8,000,000		
Veenkoloniën	28,000,000	73,000,000	10,000,000	26,000,000		
Totaal	126,000,000	259,000,000	115,000,000	67,000,000		

