

BTO | September 2015

BTO rapport

Grondwateraanvulling
en achtergrondverlaging
in de provincie Noord-
Brabant

BTO

Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant

BTO 2015.055 | September 2015

Opdrachtnummer

400390

Projectmanager

dr. Edu Dorland

Opdrachtgever

BTO-Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger

Arnaut van Loon

Auteurs

J.P.M. Witte, W.J. Zaadnoordijk, D.G. Cirkel, I. Leunk & H.F.M. Aarts

Jaar van publicatie
2015

Meer informatie
prof. dr. ir. J.P.M. Witte
T 06-15239215
E flip.witte@kwrwater.nl

Dankwoord

De resultaten van dit onderzoek zijn besproken in de werkgroep achtergrondverlaging van de Nederlandse Hydrologische Verenging. We bedanken de leden voor hun commentaar, vooral Jan van Bakel en Gerrit Schouten omdat zij dat het meest serieus deden. Ook gaat onze dank uit naar Cor Jacobs (WUR) en Reinder Brolsma (Deltares) voor hun informatie over het waterverbruik van steden.

Ten slotte bedanken we de opdrachtgever, Brabant Water. Tijdens een presentatie in Den Bosch ontstond een levendige discussie, waarvan we veel hebben opgestoken.

De auteurs,

Nieuwegein, dinsdag 9 september 2015

Samenvatting

Sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw is bijna overal in Nederland de grondwaterstand gedaald, vooral op de hogere zandgronden. Bij analyses blijkt een paar decimeter van deze verlaging, de achtergrondverlaging, veelal niet te kunnen worden verklaard. In recente discussies wordt een mogelijke oorzaak van achtergrondverlaging buiten beschouwing gelaten: de afname, in de loop der tijden, van de grondwateraanvulling. Dit is de hoeveelheid neerslagwater die niet verdampt, niet over het maaiveld afstroomt of in het riool verdwijnt, maar die via de bodem de grondwatervoorraad aanvult.

Opbrengstcijfers in de landbouw zijn de afgelopen halve eeuw enorm gestegen, en dat zal hebben geleid tot meer verdamping. Bovendien zijn natuurgebieden dichtgegroeid met grassen, bomen en struiken. Die verdampen meer dan de oorspronkelijke vegetatie. Ook stedelijke uitbreiding kan hebben bijgedragen aan de daling van de grondwaterstand, doordat in bebouwd gebied een groot deel van het neerslagwater in het riool terechtkomt.

In dit rapport zijn voor het grondgebied van de provincie Noord-Brabant deze mogelijke oorzaken onderzocht. Dat gebeurde op basis van zowel opbrengstcijfers uit de landbouw, als kaarten met verschillende categorieën landgebruik. Schattingen van veranderingen in landgebruik en gewasopbrengst werden vertaald naar veranderingen in grondwateraanvulling. Daarna werd met een hydrologisch model van de provincie het effect op de grondwaterstand gesimuleerd. Deze analyse leidde tot de volgende conclusies:

1. Sinds 1950 hebben veranderingen in landgebruik en stijging van gewasopbrengsten geleid tot een daling van de grondwaterstand. Wanneer met deze oorzaken geen rekening wordt gehouden leiden hydrologische berekeningen tot een verlaging van de grondwaterstand die minder is dan de metingen uitwijzen. Het verschil wordt 'achtergrondverlaging' genoemd.
2. Per type landgebruik is de toename van de gewasopbrengst de belangrijkste veroorzaker van de achtergrondverlaging.
3. Het percentage bebouwd gebied in de provincie is sinds 1950 van 5 naar 17 % gestegen, vooral ten koste van landbouwgrond. Daardoor is, volgens de berekeningen, de toename van het areaal bebouwd gebied een minstens even grote, en waarschijnlijk grotere, veroorzaker van de gemiddelde achtergrondverlaging in de provincie.
4. De grondwaterstands daling door grondwaterwinning neemt toe naarmate de grondwateraanvulling afneemt, dus naarmate de opbrengsten in de landbouw stijgen. De volgtijdelijkheid van de ingrepen in de waterhuishouding bepalen dus de resultaten van hydrologische modellen. Overwogen dient te worden hiermee voortaan rekening te houden in effectstudies.
5. Omdat verdamping hoofdzakelijk in het groeiseizoen optreedt, hebben veranderingen in landgebruik en gestegen gewasopbrengsten vooral geleid tot een daling van de laagste grondwaterstand (*GLG*); cultuurtechnische ingrepen hebben met name de hoogste grondwaterstand (*GHG*) omlaag getrokken.
6. Minimaal de helft (conservatieve schatting) van de achtergrondverlaging in het zandlandschap van de provincie Noord-Brabant (gemiddeld ca. 3 dm) kan worden verklaard door veranderingen in landgebruik en gestegen gewasopbrengsten. Feitelijk bestaat daardoor dit deel van de onverklaarbare verlaging niet meer: het is 'opgelost'.

Hoewel deze conclusies helder voortvloeien uit de in deze studie gepresenteerde berekeningen, zijn de resultaten van die berekeningen met grote onzekerheden omgeven. Om nog beter onderbouwde uitspraken te kunnen doen over de gevolgen van het veranderde landgebruik op de grondwaterstand, worden de volgende onderzoeken aanbevolen, die op korte termijn kunnen worden gerealiseerd:

1. Onderzoek naar de gevolgen van veranderingen, sinds ca. 1950, in landgebruik en in gewasopbrengsten in een typisch agrarisch zandlandschap ter grootte van 100-1000 km² waar andere invloeden, zoals verstedelijking, zoveel mogelijk kunnen worden genegeerd. Het vraagstuk van achtergrondverlaging heeft immers vooral betrekking op het landelijk gebied (landbouw en natuur), dus is het verstandig een gebied te selecteren waar andere oorzaken niet belangrijk zijn. In dit onderzoek ligt de nadruk op veranderingen in de landbouw. Betrek in dit onderzoek ook toekomstprojecties, met name de mogelijke consequenties van klimaatverandering.
2. Onderzoek naar de gevolgen van het dichtgroeien van droge natuurgebieden met grassen, struiken en bomen. Droge natuurgebieden hebben wegens hun omvang vaak een traag reagerend grondwatersysteem en de veranderingen in landgebruik (staken beweiding door schapen, aanplant van naaldhout) vonden vooral voor WOII plaats. Daarom zouden veranderingen in zowel de 19^e als de 20^e eeuw in het onderzoek betrokken moeten worden.
3. Een gevoeligheidsanalyse naar de effecten van landgebruiksveranderingen op de met hydrologische modellen (mechanistische en tijdreeksmodellen) berekende grondwaterstandsaling door grondwaterwinning. Een dergelijke analyse biedt inzicht in de gevolgen van zowel de volgtijdelijkheid als van het negeren van landgebruiksveranderingen.

Inhoud

1	Aanleiding en doel	10
2	Methode en leeswijzer	12
3	Verandering in landgebruik en gewasopbrengst	14
3.1	Verandering in landgebruik op hoofdlijnen	14
3.2	Bebouwd gebied	14
3.3	Natuur	15
3.4	Landbouw	17
4	Veranderingen in de jaarlijkse grondwateraanvulling	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Bebouwd gebied	20
4.3	Natuur	21
4.4	Landbouw	22
4.5	Overig	23
4.6	Overzicht van de afname der grondwateraanvulling	23
5	Dynamisch verloop van de grondwateraanvulling	26
5.1	Inleiding	26
5.2	Bebouwd gebied	26
5.3	Natuur	26
5.4	Landbouw	27
5.5	Overig	28
5.6	Tijdverloop van de gemiddelde aanvulling	29
6	Veranderingen in de grondwaterstand	30
6.1	Inleiding	30
6.2	Verlaging door verminderde grondwateraanvulling	30
6.3	De invloed van de grondwateraanvulling op de berekende grondwaterstands­daling door grondwaterwinning	32
7	Discussie	36
7.1	Bespreking resultaten	36
7.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	39
7.3	Conclusies	41
	Referenties	42
	Bijlagen	44

1 Aanleiding en doel

Sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw is bijna overal in Nederland de grondwaterstand gedaald, vooral op de hogere zandgronden (Rolf, 1989). Bij analyses van de oorzaken blijkt een gedeelte van die verlaging, een paar decimeter, veelal niet te kunnen worden verklaard (Rolf, 1989; Maas, 2012). Deze restpost, de zogenaamde 'achtergrondverlaging' (Rolf, 1989), kan aanleiding geven tot discussies over de vraag wie de veroorzaker is van droogteschade aan landbouw en natuur (o.a. Van Bakel (2012)). Recentelijk is in het hydrologische vakblad *Stromingen* deze discussie opgelaaid. De manier waarop de gevolgen van grondwateronttrekkingen op de grondwaterstand wordt berekend of gemeten zou niet kloppen (Van der Gaast, 2012; Van den Akker, 2013; Van der Gaast, 2013; Van den Akker, 2014b, a), wat door anderen echter weer wordt afgezwakt of betwist (Maas, 2012; Olsthoorn, 2014a, b).

In recente discussies wordt tot nu toe echter een mogelijke oorzaak van achtergrondverlaging buiten beschouwing gelaten: de afname, in de loop der tijden, van de grondwateraanvulling. Dit is de hoeveelheid neerslagwater die niet verdampt, over het maaiveld afstroomt of in het riool verdwijnt, maar die uiteindelijk vanuit de bodem de verzadigde grondwatervoorraad aanvult.

Opbrengstcijfers in de landbouw zijn de afgelopen halve eeuw enorm gestegen, en dat zal hebben geleid tot meer verdamping. Bovendien zijn natuurgebieden, mede onder invloed van de atmosferische stikstofdepositie en door bezuinigingen op het natuurbeheer, dichtgegroeid met grassen, bomen en struiken. Die verdampen meer dan de oorspronkelijke vegetatie. Het geen rekening houden in hydrologische berekeningen met de toegenomen verdamping, en dus met de afgenomen grondwateraanvulling, zal een deel van de verklaring kunnen zijn waarom er soms vele decimeters verlaging 'zoek' zijn. Ook stedelijke uitbreiding kan hebben bijgedragen aan de daling van de grondwaterstand, doordat een groot deel van het neerslagwater in bebouwd gebied het riool instroomt, en dan niet meer het grondwater kan bereiken.

In dit rapport verkennen wij, in opdracht van waterbedrijf Brabant Water, wat veranderingen in het landgebruik via een afname van de grondwateraanvulling hebben bijgedragen aan de daling van de grondwaterstand in de provincie Noord-Brabant.

2 Methode en leeswijzer

In ons onderzoek verkennen of een afname van de grondwateraanvulling de achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant zou kunnen verlagen. De nadruk ligt daarbij op de toegenomen verdamping in de landbouw, waarbij wij voortbouwen op onderzoek door Aarts & Degenhart (1996) naar het waterverbruik van landbouwgewassen in deze provincie. Een afname van de aanvulling zou kunnen zijn veroorzaakt door zowel veranderingen in landgebruik (andere gewassen, toename bebouwd gebied, toename bebossing), als door een toename van de gewasproductie.

Onze werkwijze is als volgt:

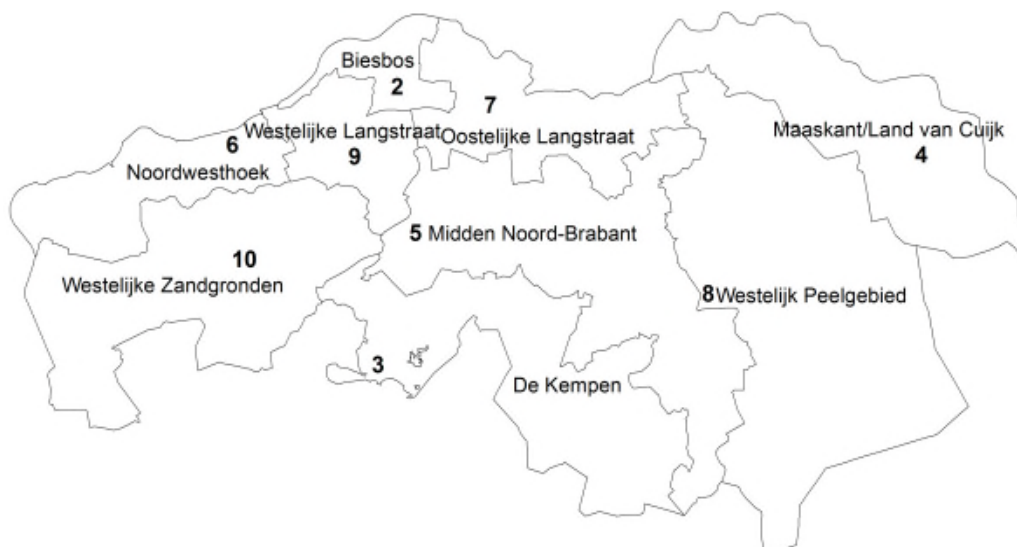
1. We vergelijken twee zichtjaren met elkaar: 1950 en 2010.
2. Meteorologisch karakteriseren we beide zichtjaren met gegevens over de neerslag en referentiegewasverdamping in de zes jaren 2007-2013. Verschillen die we vinden in grondwateraanvulling zijn dan volledig toe te schrijven aan veranderingen in landgebruik en gewasopbrengst. Een veronderstelling hierbij is dat verschillen in gewasopbrengsten tussen 1950 en 2010 niet zijn toe te schrijven aan meteorologische verschillen tussen de twee zichtjaren. Deze veronderstelling hebben we onderzocht en hij blijkt correct te zijn (Bijlage I).
3. Binnen de provincie voeren we een ruimtelijke differentiatie in de berekeningen aan. Gegevens over het landgebruik door de landbouw zijn bij het CBS per gemeente bekend. De indeling in gemeenten is in de loop van de onderzochte perioden echter aanzienlijk gewijzigd. Daarom maken we, in navolging van Aarts & Degenhart (1996), gebruik van een indeling op een grover schaalniveau, namelijk die in negen regio's die qua productieomstandigheden min of meer homogeen zijn (Bijlage II). Deze regio's sluiten zo goed mogelijk aan bij zowel de regio-indeling die door Aarts & Degenhart (1996) is gehanteerd, als ook bij de nieuwe gemeente-indeling (Figuur 2-1).
4. Binnen iedere regio maken we vervolgens ruimtelijk onderscheid in vier hoofdcategorieën van landgebruik: 'landbouw', 'bebouwd', 'natuur', en 'overig'. Binnen deze categorieën kunnen weer andere klassen voorkomen (zoals bij 'landbouw': aardappel, gras, etc.), maar deze worden uitgemiddeld over de hoofdcategorieën en dus niet nader gelokaliseerd.
5. Op basis van statistieken van het Centraal Bureau voor de Statistiek, onderzoeken we hoe het landgebruik en de gewasopbrengsten per regio tussen 1950 en 2010 is veranderd (Hoofdstuk 3).
6. Veranderingen in landgebruik en in gewasopbrengsten kunnen leiden tot een verandering in de verdamping en de grondwateraanvulling. Op basis van de bevindingen in Hoofdstuk 3 en op basis van literatuuronderzoek en eenvoudige berekeningen, maken we in Hoofdstuk 4 een zo goed mogelijk schatting van de jaarlijkse grondwateraanvulling in 1950 en 2010. We onderscheiden daarbij twee varianten:
 - o variant 1, waarin de aanvulling in de landbouw sterk is gedaald;
 - o variant 2 (de Van Bakel variant), met een twee keer zo kleine daling van de aanvulling als variant 1.
7. We zijn ook geïnteresseerd in de mate waarin veranderingen in de grondwateraanvulling, invloed hebben gehad op de dynamiek van de grondwaterspiegel (uitgedrukt in Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand *GHG* en gemiddeld laagste grondwaterstand *GLG*). Om dat te kunnen onderzoeken dienen we te weten hoe de grondwateraanvulling door het jaar heen varieert. Dat onderzoeken we in Hoofdstuk 5.
8. In Hoofdstuk 6 onderzoeken we wat de verandering van de grondwateraanvulling kan hebben betekend voor de grondwaterstand. Dat doen we met een provinciaal

grondwatermodel waarin we de grondwateraanvulling als bovenrand opleggen. De berekening gebeurt in de volgende drie stappen:

- a) Simulatie van grondwaterstanden gebaseerd op het landgebruik en de gewasopbrengsten uit 1950.
- b) Simulatie van grondwaterstanden gebaseerd op het landgebruik en de gewasopbrengsten uit 2010.
- c) Resultaten van stap b) aftrekken van stap a), wat resulteert in de daling van de grondwaterstand die is toe te schrijven aan het veranderende landgebruik en veranderende gewasopbrengsten.

In dit hoofdstuk analyseren we ook wat het effect op de grondwaterstand is van grondwateronttrekking ten behoeve van de drinkwatervoorziening, en hoe dit effect afhangt van de grondwateraanvulling.

9. We besluiten met een hoofdstuk (Hoofdstuk 7) waarin we de resultaten bespreken, onder andere in vergelijking met die van eerdere onderzoeken. Tevens behandelen we de praktische implicaties van ons onderzoek en doen we aanbevelingen om meer grip te krijgen op het fenomeen 'achtergrondverlaging'.



Figuur 2-1. Gebruikte regio-indeling van gemeenten.

3 Verandering in landgebruik en gewasopbrengst

3.1 Verandering in landgebruik op hoofdlijnen

In deze studie beperken we ons tot vier hoofdcategorieën van landgebruik: 'landbouw', 'bebouwd', 'natuur' en 'overig'. In Tabel 3-1 staan de oppervlakten per regio vermeld, evenals de procentuele verdeling van de oppervlakten over de hoofdcategorieën (telt op tot 100%).

Tabel 3-1. Oppervlakte en procentuele verdeling van drie hoofdcategorieën van landgebruik (landbouw, bebouwd, natuur, overig) per regio.

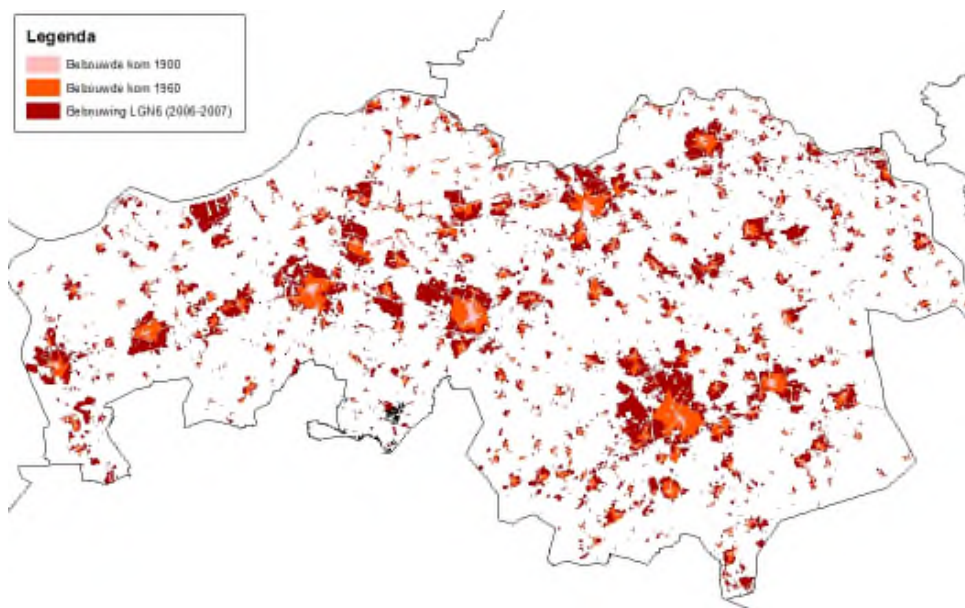
	Areaal (ha)	Procentuele verdeling							
		landbouw		bebouwd		natuur		overig	
		1950	2010	1950	2010	1950	2010	1950	2010
Biesbos	12 191	56	51	3	8	11	10	30	32
De Kempen	64 935	68	67	3	8	26	25	3	0
Maaskant/Land van Cuijk	58 087	74	75	4	12	13	12	9	1
Midden Noord-Brabant	85 178	68	50	9	26	23	21	0	3
Noordwesthoek	31 299	80	70	2	11	4	4	14	15
Oostelijke Langstraat	37 900	74	61	9	25	8	8	9	6
Westelijk Peelgebied	119 630	74	59	4	15	21	20	0	6
Westelijke Langstraat	22 213	74	62	6	17	15	14	6	7
Westelijke Zandgronden	73 774	65	55	6	19	16	15	13	11
Totaal	505 208	71	61	5	17	18	17	6	6

3.2 Bebouwd gebied

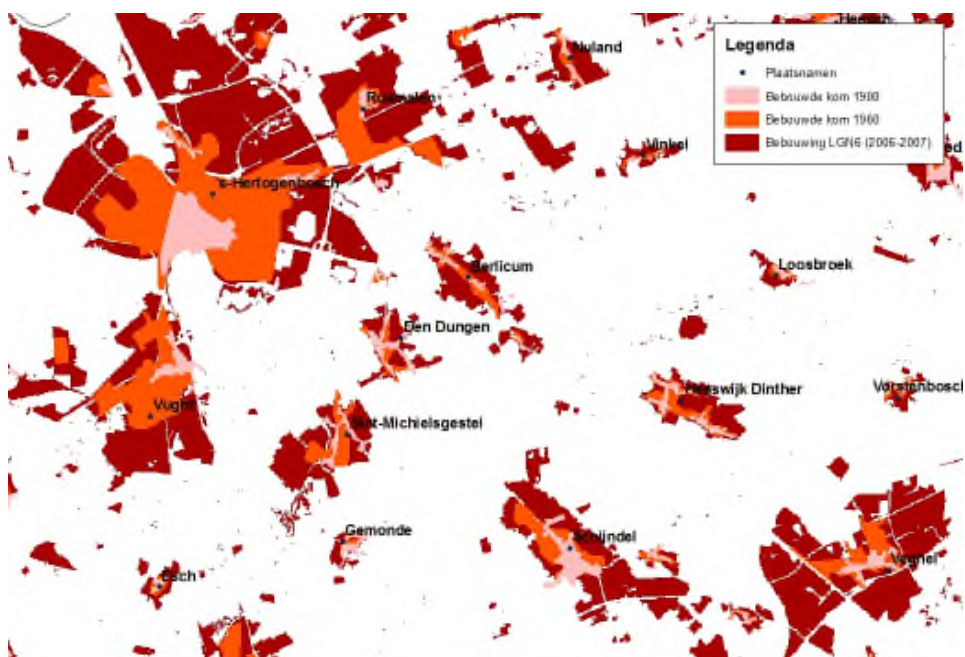
Het CBS heeft cijfers over de bebouwing per gemeente beschikbaar vanaf 1972. Onder de categorie 'bebouwd' vallen woon- en bedrijfs- en bouwterreinen, inclusief tuinen, trapveldjes, groenvoorzieningen kleiner dan 1 ha, straten, parkeerplaatsen, etc.. De provincie Noord-Brabant heeft op ons verzoek twee kaarten aangeleverd met daarop de bebouwde kommen in 1960 en 1900. In 1900 was er 78 km² bebouwde kom, circa 1.5 % van de provincie. Dit loopt op via 274 km² (5 %) in 1960 naar 601 km² (12 %) in 2010.

In Figuur 3-1 is te zien hoe in de hele provincie de bebouwing is toegenomen sinds 1900. Vooral tussen 1960 en 2006 is een sterke toename te zien. Bij de grote steden zijn nieuwe wijken bijgebouwd, maar ook dorpen zijn sterk in omvang toegenomen (Figuur 3-2).

Besluit. Bij de hydrologische berekeningen gebruiken we de kaarten van 1960 en 2010, waarbij de eerste kaart dient als schatter voor de situatie in 1950.



Figuur 3-1. Verandering van bebouwing van 1900 tot 2006 in provincie Noord-Brabant.



Figuur 3-2. Detail van toename bebouwing (1900-1960-2006) rond 's-Hertogenbosch en Veghel.

3.3 Natuur

Over de historische ontwikkeling van de natuur verschaffen de CBS statistieken slechts informatie voor de hele provincie over twee subcategorieën: ‘bos’ en ‘open natuurlijk terrein’ (Tabel 3-2). Het areaal natuur is afgenomen van 18 % van de provincie in 1952 tot 15% in 1989. Na 1989 neemt het areaal weer toe tot 17 % in 2010. Sinds 1952 is het aandeel bos sterk toegenomen ten koste van het aandeel open natuurlijke terreinen. Van het areaal natuur bestaat in 1952 62 % uit bos, tegen 85 % in 201 (Tabel 3-2).

Tabel 3-2. 'Bos' en 'open natuurlijk terrein' in provincie Noord-Brabant (bron: CBS).

Jaar	ha	% Bos	% Open
1952	90700	62	38
1960	86100	72	28
1972	83000	80	20
1989	78700	83	17
1993	78900	84	16
1994	78900	84	16
1996	83800	86	14
2000	84300	87	13
2003	84300	86	14
2006	83800	86	14
2008	83800	86	14
2010	84300	85	15

De grootste verandering van heide en woeste grond naar (productie)bos en landbouw heeft zich voor 1950 voorgedaan. Bij het CBS zijn echter geen gegevens over arealen bos en natuurlijk terrein van voor het jaar 1952 beschikbaar. We kunnen voor die vroege periode wel gebruik maken van kaarten in de historische atlas. Dan zien we rond 1900 grote gebieden heide en woeste gronden. Het voert te ver om dit in detail uit te zoeken, maar voor een aantal gebieden hebben we de ontwikkeling onderzocht:

- Landschotse Heide (VVV_de_Brabantese_Kempen, z.j.t.)
In 1937 afspraak om 500 ha vochtige heide te ontginnen, begin jaren 60 start van de ontginning. Noordelijk deel gespaard. Nu bos en landbouw, klein deel heide over.
- Leender Heide (Horst & Spek, 2011).
Vraag naar Grove den vanuit de mijnbouw (jaren 30). In 1931 en 1936 aankoop 1590 ha heidecomplex. In 9 jaar tijd werd 900 ha woeste grond omgezet in productief naaldbos. Uitgevoerd door werklozen die tewerkgesteld werden. Te natte gebieden werden ontwaterd.
- Tussen Gilze, Riel en Alphen-Oosterwijk.
Groot gebied heide en woeste grond ontgonnen en nu grotendeels landbouw (vergelijking historische kaart en huidige topografische kaart). Onduidelijk wanneer de ontginning heeft plaatsgevonden.
- Chaamse bossen
Al begin 20^e eeuw omgezet van heide naar bos (1900 en 1934).

Van de heide en woeste gronden zijn nog maar kleine stukken over. In de jaren voor de tweede wereldoorlog zijn grote gebieden in cultuur gekomen, of ze werden omgezet naar productiebos; vooral vanuit de mijnbouw was grote behoefte aan hout. Andere gebieden werden omgezet in landbouwgrond. Veel gebieden waren te nat, en zowel voor landbouw als voor bosbouw zijn gebieden ontwaterd.

De CBS twee categorieën 'bos' en 'open natuurlijk terrein' zijn tamelijk grof om te gebruiken bij hydrologische berekeningen. Bovendien zijn deze alleen bekend voor de hele provincie (Tabel 3-2). Op basis van LGN6 (referentiejaar 2007/2008; Anonymous (2012)) kan echter een nadere detaillering van de natuur per regio worden geschat voor het zichtjaar 2010. De oppervlakten per regio en de verdeling over drie uit het LGN gedestilleerde subcategorieën 'bos', 'droog' en 'nat' zijn opgenomen in Tabel 3-3. Uit de percentages van 2010 en de toename van het areaal bos volgens Tabel 3-2, is tevens geschat wat in 1950 de procentuele verdeling was van de drie natuurcategorieën.

N.B. De opmerkelijke lezer zal het misschien zijn opgevallen dat de totale oppervlakte in Tabel 3-3 (83722 ha) licht afwijkt van die in Tabel 3-2 (83800 ha in 2008). Ook wijkt het totale percentage bos in 1950 (63 %) iets af van het percentage dat voor 1952 in gegeven in Tabel 3-2 (62 %). Zulke afwijkingen hebben te maken met het gebruik van verschillende bronnen.

Tabel 3-3. Areaal natuur met procentuele verdeling in 'bos', 'droog' en 'nat'. Verdeling in 2010 gebaseerd op LGN6; verdeling in 1950 door het percentage bos uit 2010 te delen door de factor waarmee het areaal bos volgens Tabel 3-2 tussen 1952 en 2010 is toegenomen (nl. 1.37) en de overige categorieën naar rato te verdelen over het resterende percentage.

	Oppervlakte (ha)	Verdeling (%)					
		1950			2010		
		bos	droog	nat	bos	droog	nat
Biesbos	1212	40	0	59	55	0	44
De Kempen	15932	68	27	5	93	6	1
Maaskant/Land van Cuijk	6799	69	25	6	95	4	1
Midden Noord-Brabant	17847	65	28	7	89	9	2
Noordwesthoek	1217	38	0	62	52	0	48
Oostelijke Langstraat	2933	60	32	8	82	15	4
Westelijk Peelgebied	23853	59	21	19	81	10	9
Westelijke Langstraat	3009	52	1	47	72	1	28
Westelijke Zandgronden	10920	63	16	21	86	6	8
Totaal	83722	63	19	18	86	7	7

Besluit. Omdat we verschillende landgebruikscategorieën graag ruimtelijk expliciet houden, en het areaal natuur tussen 1950 en 2010 nauwelijks is veranderd (Tabel 3-2), gebruiken LGN6 voor de ligging van natuurgebieden in zowel 1950 als in 2010. Voor de procentuele verdeling van de drie natuurcategorieën gaan we uit van Tabel 3-3.

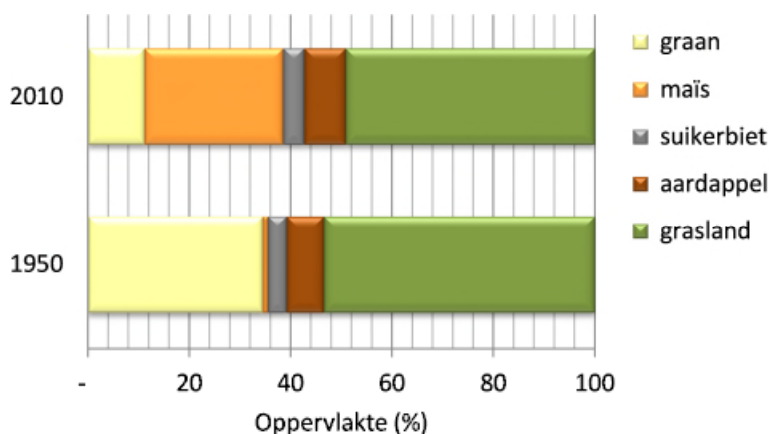
3.4 Landbouw

3.4.1 Arealen

Het CBS verstrekt alleen gegevens over de belangrijkste gewassen, die samen 68 tot 83 % van de totale oppervlakte aan landbouwgrond in de provincie beslaan (Tabel 3-4). Voor 1950 gaan we uit van het cijfer uit 1952 (83 %), voor 2010 van dat uit 2012 (68 %). Vooral het aandeel maïs flink gestegen, ten koste van graan en grasland (Tabel 3-5, Figuur 3-3).

Tabel 3-4. Aandeel 'belangrijkste gewassen' in totale landbouw in Noord-Brabant.

jaar	Oppervlakte landbouw (ha)	Oppervlakte belangrijkste gewassen (ha)	Aandeel belangrijkste gewassen (%)
1952	359400	298212	83
1972	351400	269908	77
1994	324403	240399	74
2012	308600	211133	68



Figuur 3-3. Procentuele verandering in het areaal belangrijkste landbouwgewassen.

Tabel 3-5. Areaal 'belangrijkste gewassen' per regio in 1950 en 2010.

	Oppervlakte (ha)	Verdeling (%)				
		graan	aardappel	suikerbiet	groenvoedergewassen* voederbieten maïs	gras
2012						
Biesbos	4228	34	14	11	6	34
De Kempen	31406	7	10	4	32	47
Maaskant/Land van Cuijk	29746	10	7	4	30	49
Midden Noord-Brabant	29192	6	3	1	30	59
Noordwesthoek	14995	34	27	12	8	19
Oostelijke Langstraat	15931	14	3	4	19	60
Westelijk Peelgebied	48367	7	6	2	36	48
Westelijke Langstraat	9386	17	8	6	18	51
Westelijke Zandgronden	27882	10	8	4	23	54
Totaal Noord-Brabant	211133	11	8	4	27	49
1952						
Biesbos	5661	32	5	17	2	42
De Kempen	36422	39	5	1	4	51
Maaskant/Land van Cuijk	35770	32	9	1	4	53
Midden Noord-Brabant	48729	32	5	1	4	58
Noordwesthoek	20769	34	17	19	2	26
Oostelijke Langstraat	23148	20	5	4	4	67
Westelijk Peelgebied	74085	37	7	0	4	51
Westelijke Langstraat	13563	31	4	10	2	51
Westelijke Zandgronden	40065	30	7	6	5	50
Totaal Noord-Brabant	298212	33	7	3	4	51

* In Aarts & Degenhart (1996) zijn voederbieten en maïs uitgesplitst en voor 1952 is klaver weergegeven in de kolom maïs. In de huidige CBS cijfers worden luzerne, snijmaïs en voederbieten samen weergegeven onder de noemer groenvoedergewassen. Deze gewassen zijn niet (op gemeenteniveau) uitgesplitst.

3.4.2 Opbrengsten per hectare belangrijkste gewassen

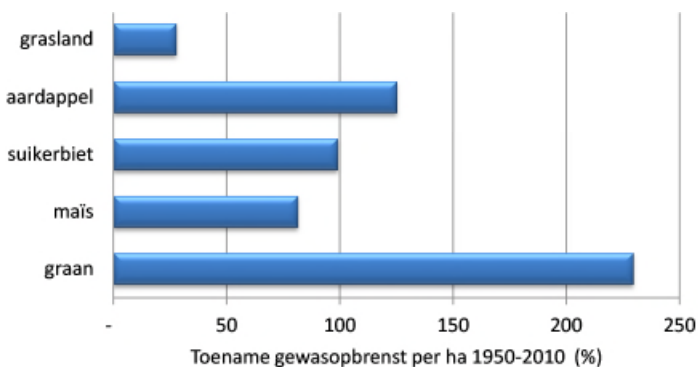
De opbrengsten Y van de belangrijkste gewassen zijn in Tabel 3-6 per regio weergegeven. De cijfers zijn ontleend aan het CBS en uitgedrukt per ha, voor gras en maïs als droge stof en voor graan, aardappel, suikerbiet en voederbiet als versgewicht. Verdere toelichting:

- Voor de historische opbrengsten uit 1950 gebruikten we de getallen voor 1948 t/m 1952 uit Aarts & Degenhart (1996). De opbrengsten zijn in Aarts & Degenhart (1996) per gemeente weergegeven en op basis van de nieuwe regio-indeling (Figuur 2-1) toegekend aan de regio's. Voor de productie van grasland had het CBS geen gegevens, zodat Aarts & Degenhart (1996) schattingen hebben gemaakt die deels op literatuurgegevens zijn gebaseerd. De opbrengst van maïs in 1950 (1948-1952) is inclusief die van klaver.
- Voor 2010 heeft het CBS alleen cijfers op provinciaal niveau beschikbaar. Voor 1994 waren er nog wel cijfers per regio gemeente. Deze hebben we aan de regio's toebedeeld en vervolgens vermenigvuldigen met factor om op provinciaal niveau precies uit te komen op de door het CBS verstrekte provinciale cijfers voor 2010 (die bedroeg voor graan, aardappel, suikerbiet, maïs en grasland respectievelijk: 1.18, 1.07, 1.24, 1.37 en 1.00). Voederbiet behoorde in 2010 niet meer tot de categorie 'belangrijkste gewassen'.

In Figuur 3-4 is de procentuele toename tussen 1950 en 2010 weergegeven van de opbrengst per hectare, gemiddeld over de hele provincie. Bij graan is de gemiddelde opbrengst in 2010 3.3 keer zo hoog als in 1950. De opbrengst van aardappel en suikerbiet is ongeveer verdubbeld. De opbrengst van grasland is wel toegenomen, maar veel minder dan bij de andere gewassen.

Tabel 3-6. De opbrengst van gewassen (Y) in kg product per ha, exclusief stro of loof. Gras en maïs in kg droge stof; graan, aardappel, suikerbiet en voederbiet in kg versgewicht.

	graan		aardappel		suikerbiet		voederbiet		maïs		grasland	
	1950	2010	1950	2010	1950	2010	1950	2010	1950	2010	1950	2010
Biesbos	3236	9276	23099	50747	41416	78954	55843	-	9000	17273	9000	11500
De Kempen	1817	7215	22289	50397	29718	73352	50190	-	9000	15821	9000	11500
Maaskant/Land van Cuijk	2369	6434	21987	52189	32926	74487	53046	-	9000	17117	9000	11500
Midden Noord-Brabant	2468	6140	22159	49487	30159	74882	52073	-	9000	16219	9000	11500
Noordwesthoek	3360	9091	24002	48953	42323	81741	56979	-	9000	17076	9000	11500
Oostelijke Langstraat	2509	8247	21459	50258	35767	81287	53623	-	9000	16691	9000	11500
Westelijk Peelgebied	2200	6316	1881	53946	29890	73454	50937	-	9000	15895	9000	11500
Westelijke Langstraat	2796	9376	23040	50552	39226	81988	54763	-	9000	18078	9000	11500
Westelijke Zandgronden	2373	8470	21443	46714	34039	74642	49568	-	9000	16542	9000	11500
Gemiddeld Noord-Brabant	2377	7834	22372	50375	38658	76925	51642	-	9000	16328	9000	11500



Figuur 3-4. Procentuele verandering in de opbrengst per hectare van 1950-2010 in Noord-Brabant.

4 Veranderingen in de jaarlijkse grondwateraanvulling

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk onderzoeken we wat veranderingen in landgebruik en gewasopbrengst voor gevolgen hebben gehad voor de jaarlijkse grondwateraanvulling. Dit doen we op basis van de resultaten van de vorige twee hoofdstukken en de meetgegevens van 69 neerslagstations en 14 stations voor de referentieverdamping over 2007-2013 (aangeduid als zichtjaar 2010).

4.2 Bebouw gebied

In § 3.2 is geconstateerd het areaal bebouwd gebied in Noord-Brabant zeer sterk is toegenomen. Deze toename kan tegengestelde effecten op de grondwateraanvulling hebben:

- In bebouwd gebied is de verdamping meestal lager dan in het landelijk gebied: potentiële verhoging van de aanvulling.
- In bebouwd gebied neemt infiltratie van neerslag naar het grondwater af doordat een groter deel van de neerslag direct via riool of oppervlaktewater wordt afgevoerd: potentiële verlaging van de aanvulling.

Over de gevolgen van verstedelijking op de grondwateraanvulling is weinig bekend, vooral door een gebrek aan goede metingen over de verdamping. In Wageningen doet men hier sinds enige jaren onderzoek aan, met metingen in verschillende steden die zeer uiteenlopende resultaten laten zien (mondellinge mededelingen dr. ir. C.M.J. Jacobs, WUR, en dr. R. Brolsman, Deltares).

Wij maken hier gebruik van een recente literatuurstudie voor het Deltaprogramma Water naar het waterverbruik van steden door De Graaf *et al.* (2013). Deze auteurs schatten de verdamping van een gemiddelde stad in Nederland, inclusief water en groen, op 66 % van de referentieverdamping (dit vinden zij een voorzichtige schatting). De afvoer van afvalwater is ongeveer gelijk aan de aanvoer van drinkwater en industriewater naar de stad, terwijl volgens de auteurs ongeveer 25% van de neerslag via het riool wordt afgevoerd. We komen hiermee tot de volgende, zeer eenvoudige benadering voor de dagelijkse grondwateraanvulling in stedelijk gebied:

$$R = 0.75P - 0.66ET_{ref} \quad [4-1]$$

Waarin:

R	=	grondwateraanvulling (mm/d)
P	=	neerslag (mm/d)
ET_{ref}	=	referentiegewasverdamping volgens Makkink (mm/d)

Gaan we voor 2010 uit van een gemiddelde neerslag in de provincie van $P = 831$ mm/jr en een referentieverdamping van $E_{ref} = 601$ mm/jr, dan komen we uit op een aanvulling van $R = 226$ mm/jr. Dat is ongeveer evenveel als het neerslagoverschot van $P - E_{ref} = 230$ mm/jr.

Er bestaan ongetwijfeld verschillen in de intensiteit en de in techniek van rioleringen tussen 1950 en 2010. In 1950 was er minder bebouwing op het riool aangesloten en dorpen en steden waren toen minder verdicht, wat gunstig is voor de grondwateraanvulling. Van de andere kant waren de riolen van een mindere kwaliteit zodat ze soms grondwater dreineerden. Bovendien wordt nieuwbouw de afgelopen decennia vaak op opgehoogde bodems aangelegd, met wadi's voor het overtollige regenwater. Of de categorie Bebouwd in 1950 nu meer of minder grondwateraanvulling genereerde dan in 2010, durven we al met al

niet te zeggen. Stichting RIONED, de koepelorganisatie voor de riolering en het stedelijk waterbeheer in Nederland, kon ons ook geen uitsluitsel geven. Vergelijking [4-1] zullen we daarom toepassen op zowel 1950 als 2010.

4.3 Natuur

In § 3.3 zijn voor 1950 en 2010 binnen natuurgebieden alleen de subcategorieën 'bos' en 'natte open natuur' en 'droge open natuur' onderscheiden. Dit is een te grove indeling om een adequaat beeld te geven van de verdamping van natuurgebieden, laat staan in de ontwikkeling van de verdampingsvraag sinds de jaren vijftig. Naalddhout verdampt doorgaans meer dan loofhout, en van het naalddhout zijn Douglas en Fijnspar weer beruchte waterverbruikers (Dolman *et al.*, 2000). Binnen de subcategorie 'open natuurlijk terrein' is het spectrum aan verdampingsgedrag mogelijk nog groter, variërend van droge bodems met kale grond en korstmoss (verdamping ca. 250 mm/jr;), via een vergraste heide tot een hoogproductief laagveenmoeras (verdamping meer dan 500 mm/jr). Het is bekend dat veel natuurgebieden zijn dichtgegroeid met grassen, door een combinatie van achterstallig beheer en atmosferische stikstofdepositie. Dat heeft ongetwijfeld tot een hogere verdamping geleid. We kunnen hier echter geen rekening mee houden binnen het bestek van deze studie. Daarom gaan we hier uit van de volgende gemiddelde cijfers voor de werkelijke verdamping van de in § 3.3 vermelde drie subcategorieën natuur: 'bos', 'droog', 'nat'. Op basis van literatuurgegevens (Jansen, 1986; Ovaa, 1990; Spieksma *et al.*, 1997; Dolman *et al.*, 2000; Voortman *et al.*, 2015), hanteren we hiervoor de volgende verdampingscijfers:

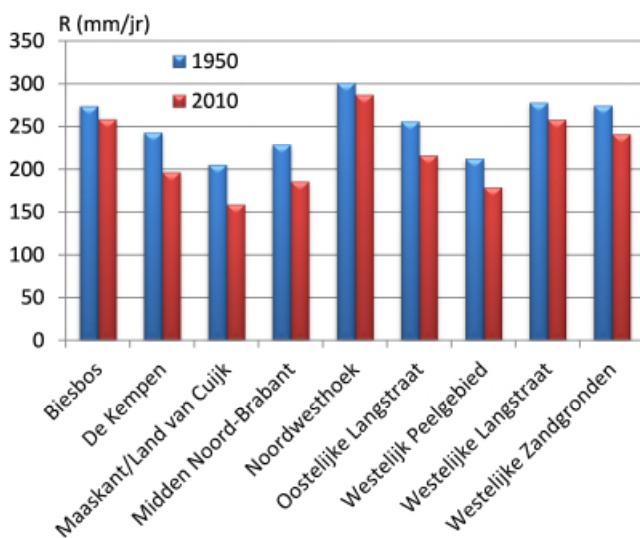
- Open terrein, droog: $ET = 450 \text{ mm/jr}$
- Open terrein, nat: $ET = 550 \text{ mm/jr}$
- Bos: $ET = 650 \text{ mm/jr}$

Verder nemen we aan dat oppervlakkige afvoer en rioolafvoer geen rol spelen in de natuur. Bij een gemiddelde neerslag (2007-2013) van 831 mm/jr, leidt dit tot een grondwateraanvulling van respectievelijk 381, 281 en 181 mm/jr. Met de procentuele areaalverdeling van de drie subcategorieën volgens Tabel 3-3 krijgen we dan voor de gemiddelde aanvulling in de natuur van Noord-Brabant:

In 1950: $R_{\text{natuur}} = 0.19 \times 381 + 0.18 \times 281 + 0.63 \times 181 = 238 \text{ mm/jr}$

In 2010: $R_{\text{natuur}} = 0.07 \times 381 + 0.07 \times 281 + 0.86 \times 181 = 202 \text{ mm/jr}$

Gemiddeld is volgens deze berekening ten gevolge van de bebossing de aanvulling in natuurgebieden tussen 1950 en 2010 met 36 mm/jr (15%) gedaald. Op dezelfde wijze is de verandering per regio berekend; zie Figuur 4-1.



Figuur 4-1. Verandering in de grondwateraanvulling R (mm/jr) van natuurgebieden tussen 1950 en 2010.

4.4 Landbouw

Gegevens over de jaarlijkse productie van het oogstbare product (Tabel 3-6) kunnen worden omgezet in cijfers over de jaarlijkse evapotranspiratie, ET . Dat doen we in drie stappen:

1. Eerst berekenen we de droge-stofproductie van de totale jaarlijkse biomassa, exclusief wortels, door de opbrengstcijfers van het CBS, Y , te vermenigvuldigen met een droge-stofcoëfficiënt C_{DS} . In Tabel 4-1 staan de getallen C_{DS} van de verschillende gewassen, overgenomen uit Aarts & Degenhart (1996). Voor gras, maïs en klaver waren de cijfers in Tabel 3-6 al uitgedrukt als droge-stofproductie van de totale oogst, zodat daarvoor geldt $C_{DS} = 1.0$. Voor graan bestaat de oogst ook uit stro, zodat de opbrengst wordt verhoogd door te vermenigvuldigen met $C_{DS} > 1$. De oogst van aardappel, suikerbiet en voederbiet was uitgedrukt als versgewicht, zodat de opbrengst met een coëfficiënt $C_{DS} < 1$ wordt teruggebracht naar een droge-stofproductie.
2. Vervolgens kan de transpiratie T van ieder gewas worden berekend door vermenigvuldiging met een transpiratiecoëfficiënt C_T . In feite is dit de reciproque van de bekende 'water-use efficiency of productivity' die aangeeft hoeveel kg water er nodig is voor de productie van één kg biomassa (droge stof). Ook deze cijfers hebben we in Tabel 4-1 ontleend aan Aarts & Degenhart (1996)¹. De jaarlijkse transpiratie wordt dus:

$$T = 10^{-4} C_{DS} C_T Y \quad [4-2]$$

Waarin:

T	=	transpiratie (mm/jr)
C_{DS}	=	droge-stofcoëfficiënt (kg droge stof kg / kg geoogst product)
C_T	=	transpiratiecoëfficiënt (kg H ₂ O / kg droge stof)
Y	=	door het CBS verstrekte cijfers over de oogst (kg/ha/jr)

3. Naast verdamping door transpiratie, is er ook verdamping vanaf de bodem (bodemverdamping, E_s) en vanaf het natte bladerdek na een neerslagbui (interceptie E_i). We nemen voor de berekening aan dat de som van beide posten constant is: is er veel kale grond, dan is E_i laag en E_s hoog, is de bodem het hele jaar volledig bedekt, dan is E_i hoog en E_s laag. De som ($E_s + E_i$) hebben we voor de belangrijkste landbouwgewassen gesimuleerd met het model SWAP (Kroes *et al.*, 2008; Van Dam *et al.*, 2008), zie Tabel 4-1 (berekeningswijze SWAP wordt besproken in § 5.3). Inderdaad blijkt er weinig verschil in ($E_s + E_i$) tussen de gewassen te bestaan; deze som bedraagt gemiddeld ca. 125 mm/jr en varieert van 115 mm/jr voor een akkerbouwgewas tot 133 mm/jr voor gras.

De uiteindelijke actuele grondwateraanvulling op jaarbasis wordt aldus:

$$R = P - (T + (E_s + E_i)) = P - (10^{-4} C_{DS} C_T Y + (E_s + E_i)) \quad [4-3]$$

Waarin:

R	=	grondwateraanvulling (mm/jr)
P	=	neerslag (mm/jr)

Combineren we de provinciale opbrengstcijfers Y van Tabel 3-3 via Verg. [4-3] met de parameters uit Tabel 4-1, dan komen we, met een gemiddelde neerslag (2007-2013) van 831 mm/jr, uit op de cijfers over de in de gemiddelde grondwateraanvulling per gewas volgens 'variant 1' in Tabel 4-2.

De rekenmethode is binnen de werkgroep achtergrondverlaging van de Nederlandse Hydrologische Vereniging bediscussieerd. Naar aanleiding daarvan stelde agrohydroloog dr. ir. P.J.T. van Bakel dat de toename van de gewasopbrengst tussen 1950 en 2010 slechts voor de helft tot uitdrukking komt in de toename van de transpiratie, doordat de landbouw tegenwoordig efficiënter produceert. Dat komt doordat er in 1950 meer oogstverliezen waren, er in 1950 meer onkruid stond en de fractie oogstbaar product van het gewas in 1950 lager was.

¹ De coëfficiënt C_{DS} is de reciproque van de factor f uit Aarts & Degenhart (1996).

Volgens de laatste auteur van dit rapport, agronoom dr. F. Aarts, overschat deze 'vuistregel van Van Bakel' de gevolgen van een efficiëntere gewasopbrengst. Niettemin gebruiken wij de vuistregel voor een tweede variant op de berekening van de grondwateraanvulling, waarvan het resultaat is opgenomen in Tabel 4-2 onder 'variant 2'. De per e-mail ingebrachte argumenten van beide experts zijn opgenomen in Bijlage III bij dit rapport.

Tabel 4-1. De drie parameters waarmee de door het CBS verstrekte cijfers over de jaarlijkse oogst Y volgens verg. [4-3] kunnen worden omgezet in jaarlijkse actuele evapotranspiratie ET.

	C_{Ds} (kg d.s. /kg product)	C_T (kg H ₂ O / kg d.s.)	$(E_s + E_f)$ (mm/jr)
Graan	1.67	300	117
Mais	1.00	210	127
Suiker- / voederbiet	0.23	230	115*
Aardappel	0.25	290	115
Grasland	1.00	370	133

*Wegens gebrek aan gegevens over gewaseigenschappen voor SWAP over suiker-/voederbiet is de waarde van aardappel genomen.

Tabel 4-2. Grondwateraanvulling van belangrijkste landbouwgewassen in 1950 en 2010, met parameterwaarden uit Tabel 4-1 volgens twee varianten: (1) zonder reductiefactor volgens Verg. [4-3]; (2) als variant 1, maar met een half zo grote transpiratietoename tussen 1950 en 2010.

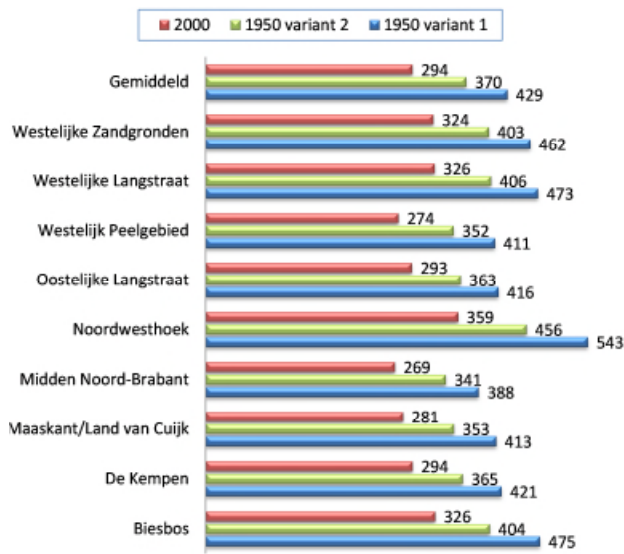
	Variant 1				Variant 2			
	Aanvulling (mm/jr)		Afname		Aanvulling (mm/jr)		Afname	
	1950	2010	(mm/jr)	%	1950	2010	(mm/jr)	%
graan	594	321	273	46	457	321	137	30
maïs	515	361	154	30	438	361	77	18
suikerbiet	511	309	202	40	410	309	101	25
aardappel	554	350	203	37	452	350	102	22
grasland	365	272	93	25	319	272	46	15
gemiddeld	465	310	155	33	381	310	71	19

4.5 Overig

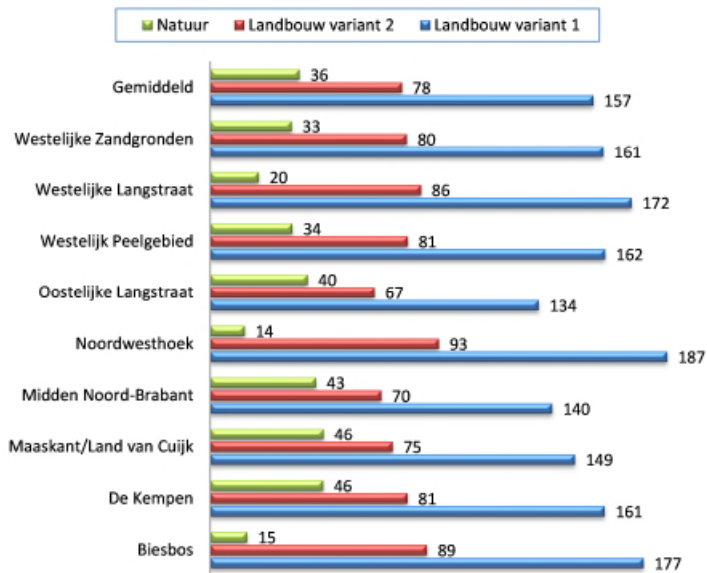
De hoofdcategorie 'overig' beslaat volgens Tabel 3-1 gemiddeld 6% van de oppervlakte van Noord-Brabant. De grondwateraanvulling van deze hoofdcategorie hebben we berekend per regio als een naar oppervlakte gewogen aanvulling van de andere drie hoofdcategorieën (landbouw, bebouwd, natuur).

4.6 Overzicht van de afname der grondwateraanvulling

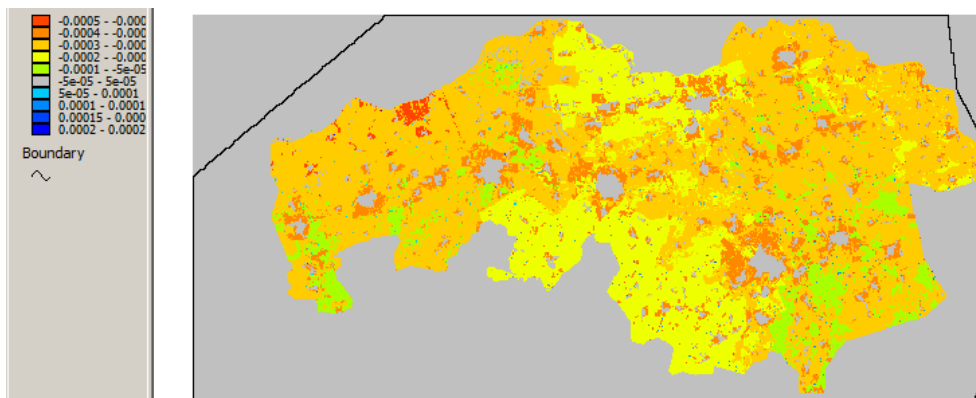
De grondwateraanvulling in de provincie daalt van gemiddeld 429 mm/jr volgens variant 1 en 370 mm/jr volgens variant 2 in 1950, naar 294 mm/jr in 2010 (Figuur 4-2). Kijken we naar de daling per hoofdcategorie, dan is die het grootst in de hoofdcategorie 'landbouw' (vooral door toename van de gewasproductie; Figuur 4-3), namelijk ten minste 78 mm/jr (variant 2). De daling in de hoofdcategorie natuur bedraagt gemiddeld 36 mm/jr, wat in § 4.3 reeds was vermeld. Voor de hoofdcategorie 'bebouwd' is er niets veranderd, omdat diens berekening onveranderd is gehouden (§ 4.2). Kijken we echter naar de ruimtelijke verandering, dan kunnen we met enige kennis van het gebied zien dat uitbreiding van het bebouwd areaal gepaard is gegaan met een afname van de grondwateraanvulling (Figuur 4-4).



Figuur 4-2. Jaarlijkse grondwateraanvulling per regio.



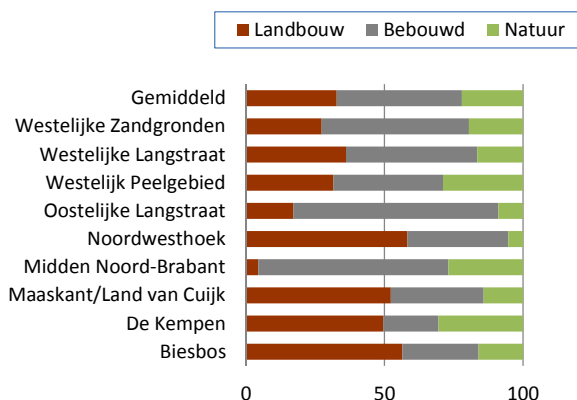
Figuur 4-3. Daling van de grondwateraanvulling per hoofdcategorie.



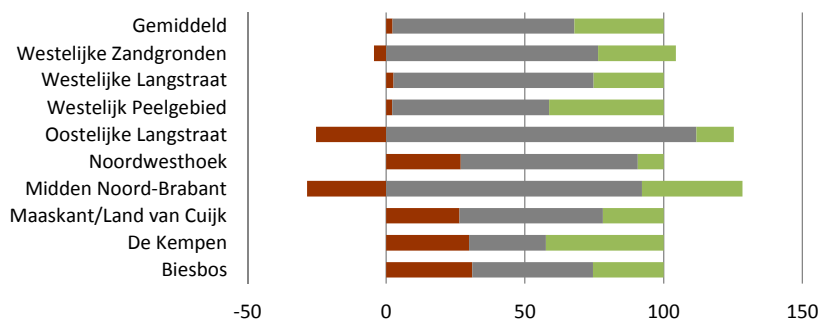
Figuur 4-4. Daling van de grondwateraanvulling (m.d⁻¹) tussen 1950 en 2010 onder variant 1. Grijs vlakken in de provincie: in zowel 1950 als 2010 bebouwd en daardoor geen verandering.

Dat binnen de hoofcategorie 'landbouw' de grootste verandering in aanvulling is opgetreden, wil niet zeggen dat deze categorie ook de grootste bijdrage heeft geleverd aan de gemiddelde daling van de grondwateraanvulling per regio of in de hele provincie. Van 1950 naar 2010 is er immers veel landbouwgrond verdwenen, terwijl er bebouwd gebied is bijgekomen (Tabel 3-1). Drukken we uit hoeveel iedere hoofcategorie heeft bijgedragen aan de oppervlakte-gewogen gemiddelde daling per regio, dan blijken 'landbouw' en 'bebouwd' ongeveer even grote veroorzakers te zijn in variant 1, terwijl in variant 2 'bebouwd' de grootste veroorzaker van de afname is (Figuur 4-5). In sommige regio's is de verstelijking ten koste van de landbouw zelfs zo sterk geweest, dat de hoofdcategorie 'landbouw' zelfs heeft bijgedragen aan een minder sterke daling van de aanvulling (vooral Oostelijke langstraat en Midden Noord-Brabant).

Variant 1



Variant 2



Figuur 4-5. Bijdrage van hoofcategorieën aan de gemiddelde daling tussen 1950 en 2010 van de grondwateraanvulling.

5 Dynamisch verloop van de grondwateraanvulling

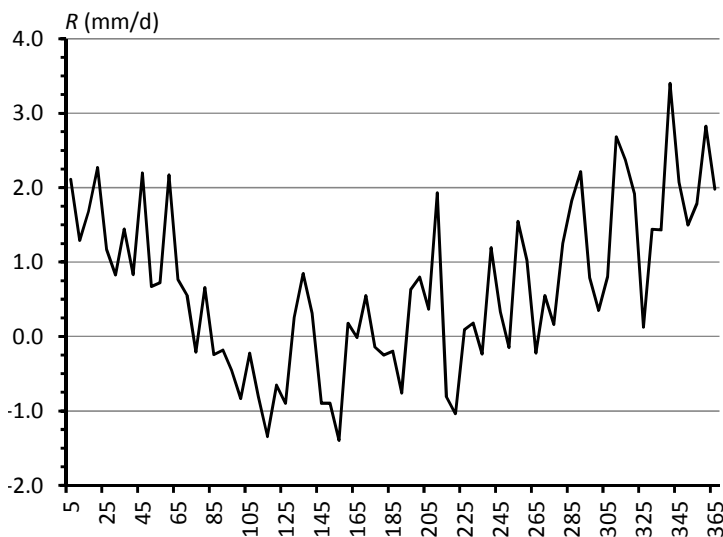
5.1 Inleiding

In het volgende hoofdstuk onderzoeken we wat veranderingen in de grondwateraanvulling hebben betekend voor de grondwaterstand. Daarbij zijn we niet alleen geïnteresseerd in de gemiddelde grondwaterstand, maar ook in de grondwaterstandsdynamiek zoals die tot uitdrukking komt in de *GHG* en *GLG*. Om die reden dienen we de jaarcijfers van het vorige hoofdstuk neer te schalen naar perioden van 5 dagen, de rekentijdstap van het in Hoofdstuk 6 te gebruiken hydrologische model.

Per regio berekenden we daarvoor eerst de vijfdaags-gemiddelde neerslag en referentieverdamping voor het zichtjaar 2010 (gemiddelde over de zeven jaren 2007-2013). We hebben daarvoor gebruik gemaakt van meetgegevens van de 69 neerslagstations en 14 stations voor de referentieverdamping die in het grondwatermodel van de provincie zijn opgenomen.

5.2 Bebouwd gebied

Voor iedere 5 dagen en elke regio passen we Verg. [4-1] toe. Het gemiddelde resultaat voor de provincie is opgenomen in Figuur 5-1.



Figuur 5-1. Berekend verloop (2007-2013) van de vijfdaagse grondwateraanvulling onder bebouwd gebied, gemiddeld over Noord-Brabant.

5.3 Natuur

Voor de natuur dienen we de jaarlijkse verdampingscijfers van § 4.3 neer te schalen naar vijfdaagse waarden. Daarvoor is met behulp van het agrohydrologische model SWAP (Van Dam *et al.*, 2008) gesimuleerd welke fractie F_{ET} van de jaarverdamping in iedere periode van vijf dagen wordt gerealiseerd. Bij de berekening is uitgegaan een standaard grasland op zwak-lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (Staringreeks B2 en O2). Voor de doorlatendheid is gebruik gemaakt van gemeten waarden voor de verzadigde doorlatendheid in aanvulling op de gefitte waarden voor de Van Genuchten functie. De in SWAP opgelegde drooglegging 0.85

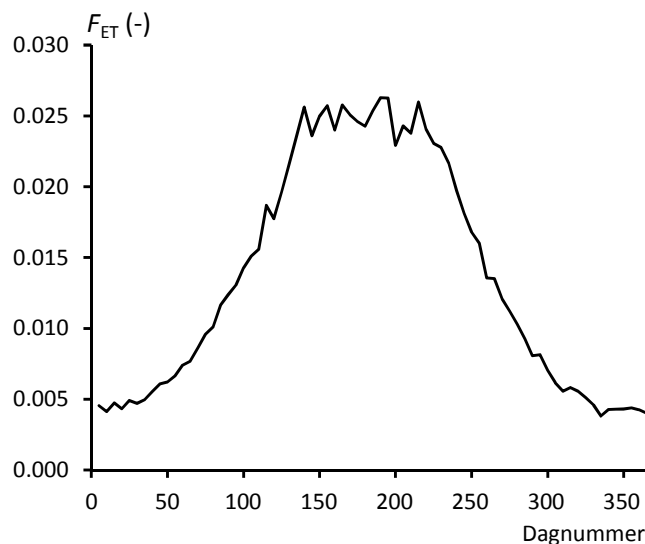
cm en drainageweerstand van 120 dagen voldoet aan ontwateringsnormen van het Cultuurtechnisch Vademecum voor grasland en bouwland (optimaal van water voorzien, nagenoeg geen natschade). In totaal is een periode van 30 jaar doorgerekend (1970-2000) met meteorologische gegevens van De Bilt. Het resultaat is opgenomen in Figuur 5-2. De 5-daagse aanvulling wordt:

$$R_5(t) = P_5(t) - F_{ET}(t)ET \quad [5-1]$$

Waarin:

R_5	=	vijfdaagse grondwateraanvulling (mm/5d)
t	=	tijd (5d)
P_5	=	vijfdaagse neerslag (mm/5d)
F_{ET}	=	vijfdaagse fractie van de jaarlijkse verdamping (-)

Deze vergelijking en het fractieverloop van Figuur 5-2 passen we toe op de drie natuurcategorieën 'bos', 'droog' en 'nat'.



Figuur 5-2. Vijfdaagse actuele verdamping als fractie F_{ET} van de jaarlijkse actuele verdamping van gras.

5.4 Landbouw

Om de in § 4.4 afgeleide jaarlijkse actuele verdamping te kunnen vertalen naar vijfdaagse waarden is met behulp van het agrohydrologische model SWAP (Van Dam *et al.*, 2008) berekend wat het vijfdaagse aandeel van de transpiratie is in de jaarlijkse transpiratie (Figuur 5-3). Schematisering en meteorologische gegevens zijn hetzelfde als voor 'natuur' (§ 5.3) is gedaan, alleen nu op basis van de parameters voor alle gewassen. De jaarlijkse transpiratie is berekend met Verg. [4-2]. Voor gras, maïs, aardappel en graan zijn de standaardparameterwaarden van SWAP gebruikt. Voor bieten waren dergelijk parameters niet beschikbaar, zodat we die categorie behandelen als aardappel. Voorts is met SWAP de 5-daagse som van bodem- en interceptieverdamping berekend (Figuur 5-4). De vijfdaagse aanvulling wordt vervolgens:

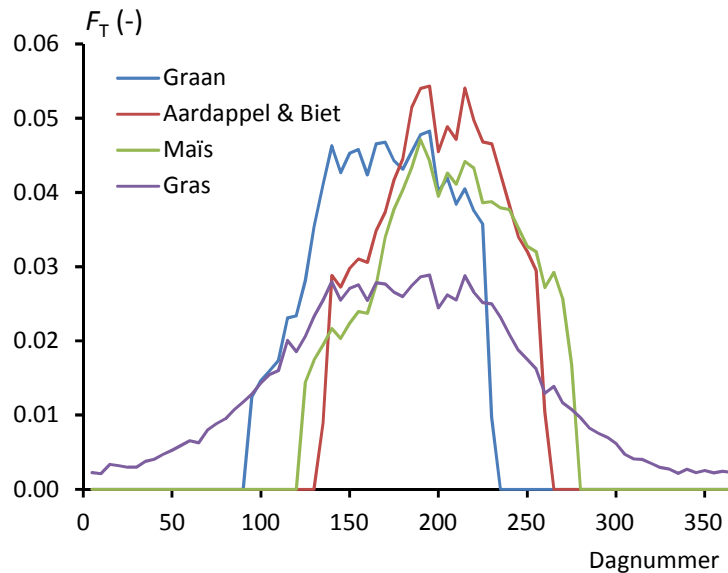
$$R_5(t) = P_5(t) - (F_T(t)T + (E_s + E_i)_5(t)) \quad [5-2]$$

Waarin:

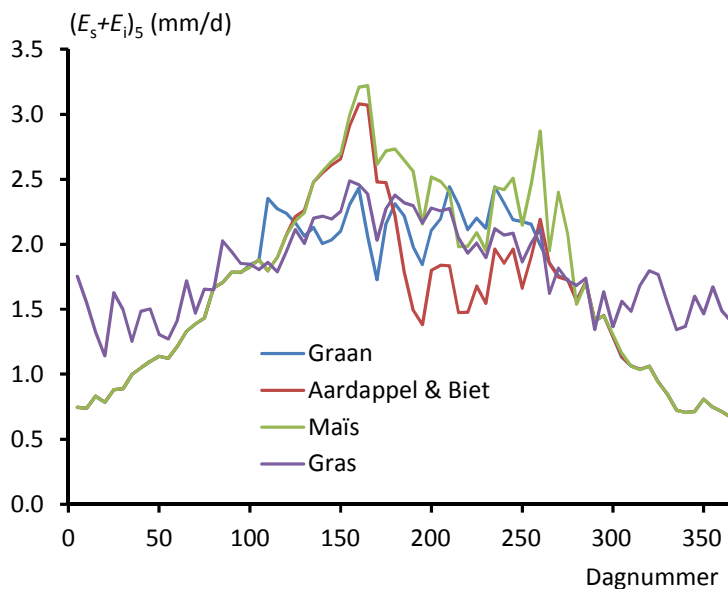
F_T	=	vijfdaagse fractie van de jaarlijkse transpiratie (-)
$(E_s + E_i)_5$	=	vijfdaagse bodem- en interceptieverdamping (mm/d)

Dat F_T gebaseerd is op gegevens van De Bilt en niet is gedifferentieerd naar regio lijkt ons acceptabel, aangezien deze factor alleen dient ter temporele neerschaling van de per regio

bepaalde transpiratiesommen. Met $(E_s + E_i)_5$ afgeleid voor De Bilt maken we mogelijk systematische fouten, maar aangezien deze grootte gemiddeld ongeveer maar 20% van de totale actuele verdamping uitmaakt en we vooral geïnteresseerd zijn in verschillen tussen 1950 en 2010, achten we deze fouten verwaarloosbaar.



Figuur 5-3. Vijfdaagse actuele transpiratie van vijf gewassen als fractie F_T van de jaarlijkse actuele transpiratie van die gewassen.



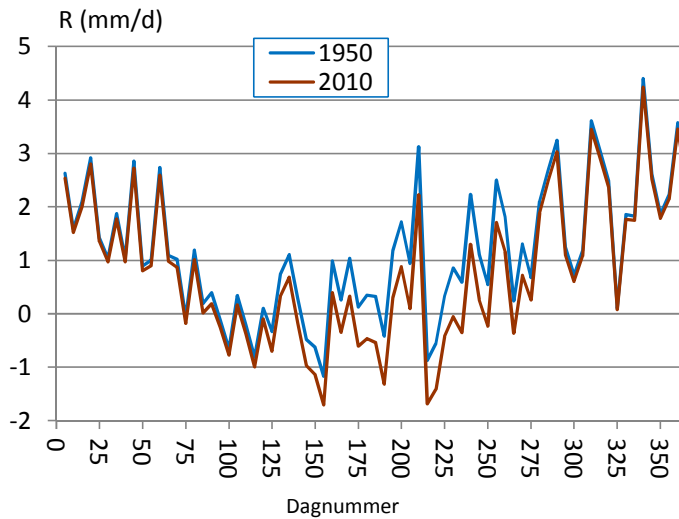
Figuur 5-4. Vijfdaagse som van actuele bodem- en interceptieverdamping ($E_s + E_i$) voor vijf gewassen.

5.5 Overig

De hoofdcategorie 'overig' bestaat volgens Tabel 3-1 gemiddeld 6% van de oppervlakte van Noord-Brabant. De grondwateraanvulling van deze hoofdcategorie hebben we berekend per regio als een naar oppervlakte gewogen aanvulling van de andere drie hoofdcategoryën (landbouw, bebouwd, natuur).

5.6 Tijdverloop van de gemiddelde aanvulling

Figuur 5-5 toont voor de provincie hoe in de loop van het jaar de naar oppervlakte gewogen gemiddelde grondwateraanvulling verandert tussen 1950 (variant 1) en 2010. De daling van de aanvulling treedt vooral op tijdens het groeiseizoen, terwijl die in de winter nagenoeg gelijk blijft. Dit is niet vanzelfsprekend omdat stedelijke uitbreiding ook gevolgen kan hebben voor de aanvulling als de verdamping zeer laag is, dus in de winter.



Figuur 5-5. Gemiddelde verloop van de aanvulling in Noord-Brabant in 1950 (variant 1) en in 2010.

6 Veranderingen in de grondwaterstand

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk onderzoeken we hoe veranderingen in de grondwateraanvulling doorwerken op de grondwaterstand. Dat doen we met het hydrologische model dat van de provincie Noord-Brabant is gemaakt (Anonymous, 2014; Van der Wal, 2014). Dit MODFLOW model rekent met cellen van 250 m x 250 m. Voor tijdsafhankelijke berekeningen hebben we gebruik gemaakt van een invoer- en uitvoertijdstep van 5 d. Voor onze analyse leggen we de grondwateraanvulling aan het model op. Verder rekenen we met het huidige stelsel aan oppervlaktewateren en winningen. Zo is de grondwaterstand gesimuleerd met de grondwateraanvulling voor het jaar 2010 en voor 1950. Het resultaat is een berekende verandering van de grondwaterstand die het gevolg is van een verandering in de grondwateraanvulling (§ 6.2).

De berekening doen we zowel stationair, op basis van de in Hoofdstuk 4 berekende jaarlijkse grondwateraanvulling, als dynamisch, op basis van het in Hoofdstuk 5 berekende verloop van de aanvulling door het jaar. De dynamische resultaten tonen we in de vorm van een verandering in de grondwaterkarakteristieken *GLG* en *GHG*. Deze zijn berekend met de GxG-tool uit Triwaco (<http://www.triwaco.nl>), die gebruik maakt van de gangbare middeling van de drie hoogste en laagste halfmaandelijke grondwaterstanden voor het tweede tot en met elfde jaar van de tijdsafhankelijke simulaties.

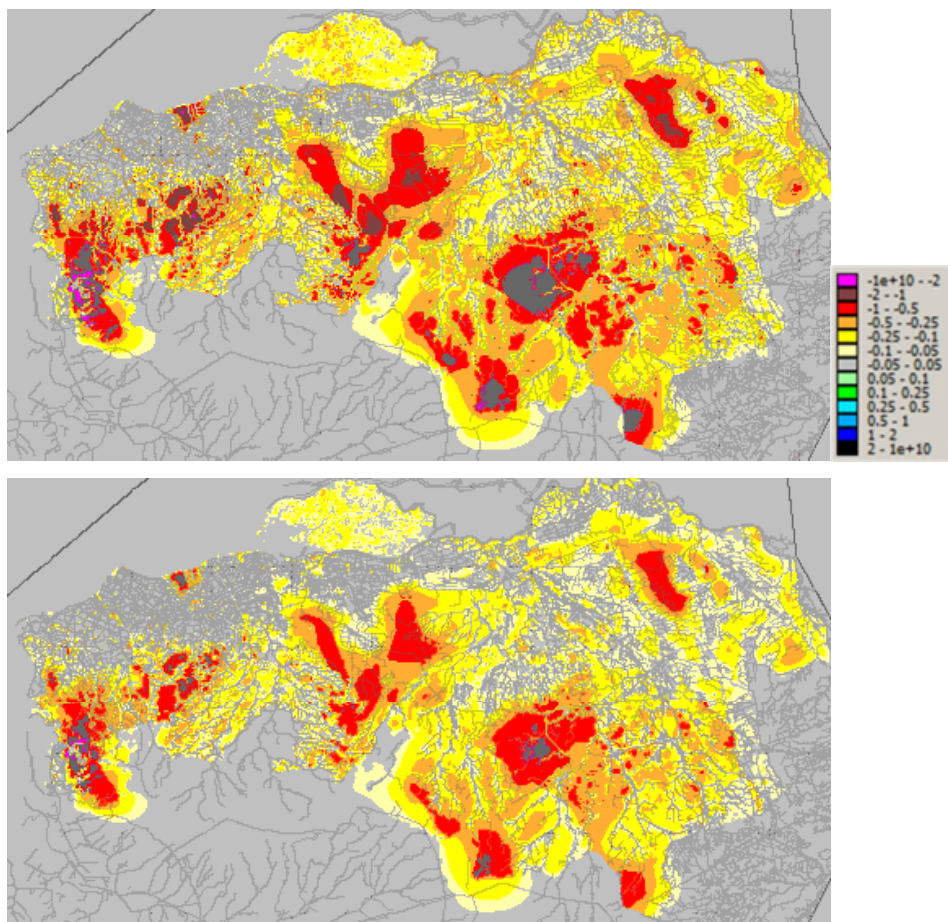
In § 6.3 onderzoeken we hoe de grondwateraanvulling samenhangt met de invloed van grondwaterwinningen op de grondwaterstand. Die invloed neemt naar verwachting toe naarmate de verliespost naar de atmosfeer en het riool groter is, waardoor sloten vaker droogvallen en hun bufferende invloed op de grondwaterstand vermindert.

6.2 Verlaging door verminderde grondwateraanvulling

De daling van de gemiddelde grondwaterstand door verandering van het landgebruik en stijging van de gewasopbrengsten is weergegeven in Figuur 6-1. Volgens verwachting treedt de grootste verlaging op waar weinig oppervlaktewater is, en is de daling onder variant 1 beduidend meer dan onder variant 2. Vooral onder de Brabantse Wal is de daling aanzienlijk, wat toegeschreven kan worden aan de aanwezigheid van klei uit de formatie van Tegelen (Strampoy).

De gemiddelde grondwaterstands daling in de provincie bedraagt 27 cm en 19 cm onder respectievelijk variant 1 en 2 (Tabel 6-1). Het begrip 'achtergrondverlaging' wordt meestal verbonden met het zandlandschap. Op de regio's die hier toe behoren (3, 5, 8, 10) is de daling 33 en 23 cm.

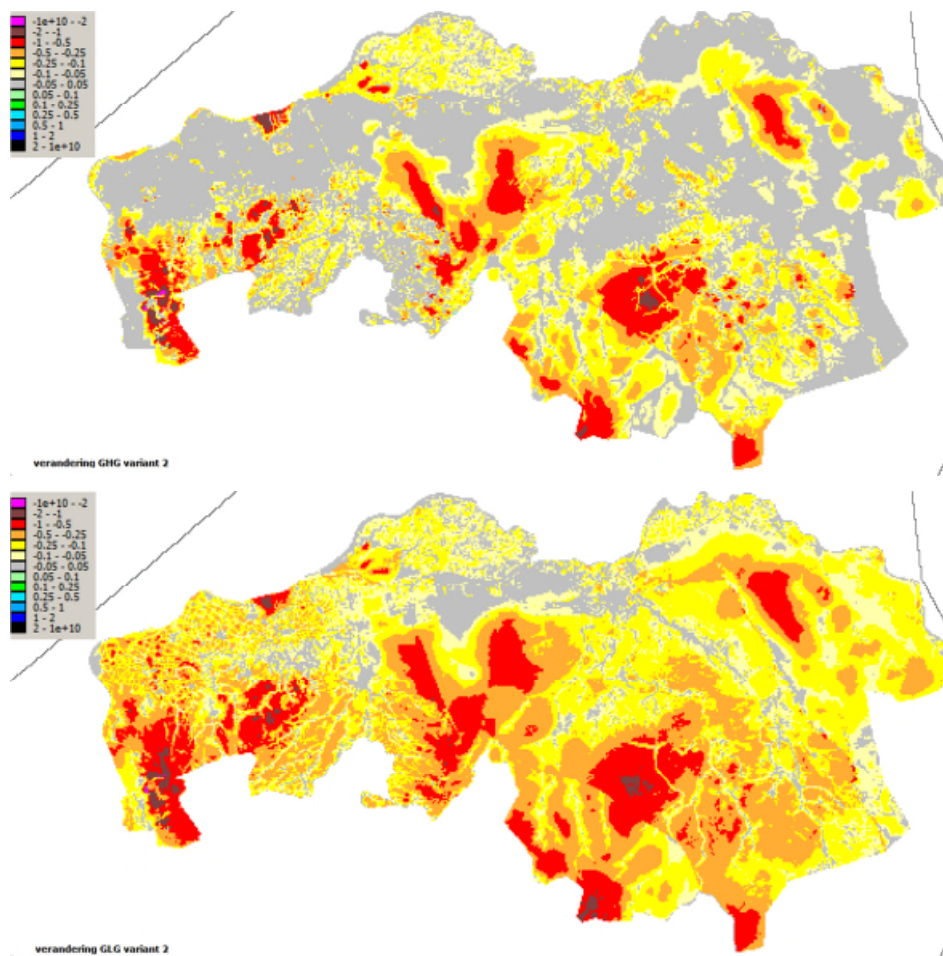
De afname van de grondwateraanvulling treedt het sterkst op in het groeiseizoen (Figuur 5-5) en zorgt daarom voor een grotere daling van de *GLG* dan voor de *GHG* (Figuur 6-2). In Tabel 6-2 is de gemiddelde daling per regio voor variant 2 samengevat.



Figuur 6-1. Berekende daling van de grondwaterstand (m) door verandering in landgebruik en stijging van gewasopbrengsten tussen 1950 en 2010, zowel onder variant 1 (boven) als variant 2 (onder).

Tabel 6-1. Verlaging van de grondwaterstand (cm) tussen 1950 en 2010 volgens de twee varianten.

	Variant 1	Variant 2
2 Biesbos	13	7.7
3 De Kempen	41	28
4 Maaskant/Land van Cuijk	19	12
5 Midden Noord-Brabant	38	28
6 Noordwesthoek	9.2	5.7
7 Oostelijke Langstraat	11	7.2
8 Westelijk Peelgebied	24	16
9 Westelijke Langstraat	16	10
10 Westelijke Zandgronden	35	25
Gemiddeld	27	19
Zandgrond (3, 5, 8, 10)	33	23



Figuur 6-2. Daling (m) van de GHG (boven) en GLG (onder) als gevolg van afname van de grondwateraanvulling door veranderingen in landgebruik en toename gewasopbrengsten (variant 2) tussen 1950 en 2010.

Tabel 6-2. Verlaging van de GHG en GLG (cm) tussen 1950 en 2010 volgens variant 2.

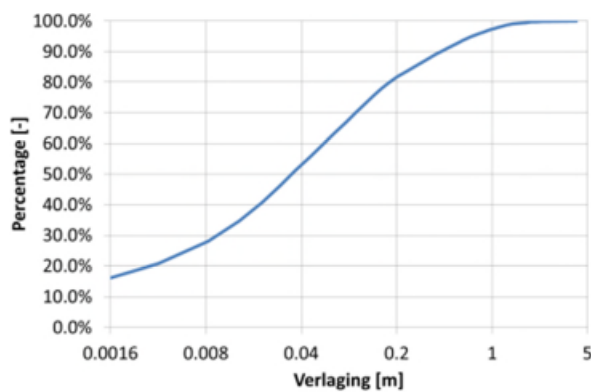
	GHG	GLG
2 Biesbos	-8	-8
3 De Kempen	-21	-39
4 Maaskant/Land van Cuijk	-8	-17
5 Midden Noord-Brabant	-22	-32
6 Noordwesthoek	-6	-23
7 Oostelijke Langstraat	-7	-7
8 Westelijk Peelgebied	-11	-22
9 Westelijke Langstraat	-12	-19
10 Westelijke Zandgronden	-20	-34
Gemiddeld	-14	-26
Zandgrond (3,5,8,10)	-18	-30

6.3 De invloed van de grondwateraanvulling op de berekende grondwaterstandsdeling door grondwaterwinning

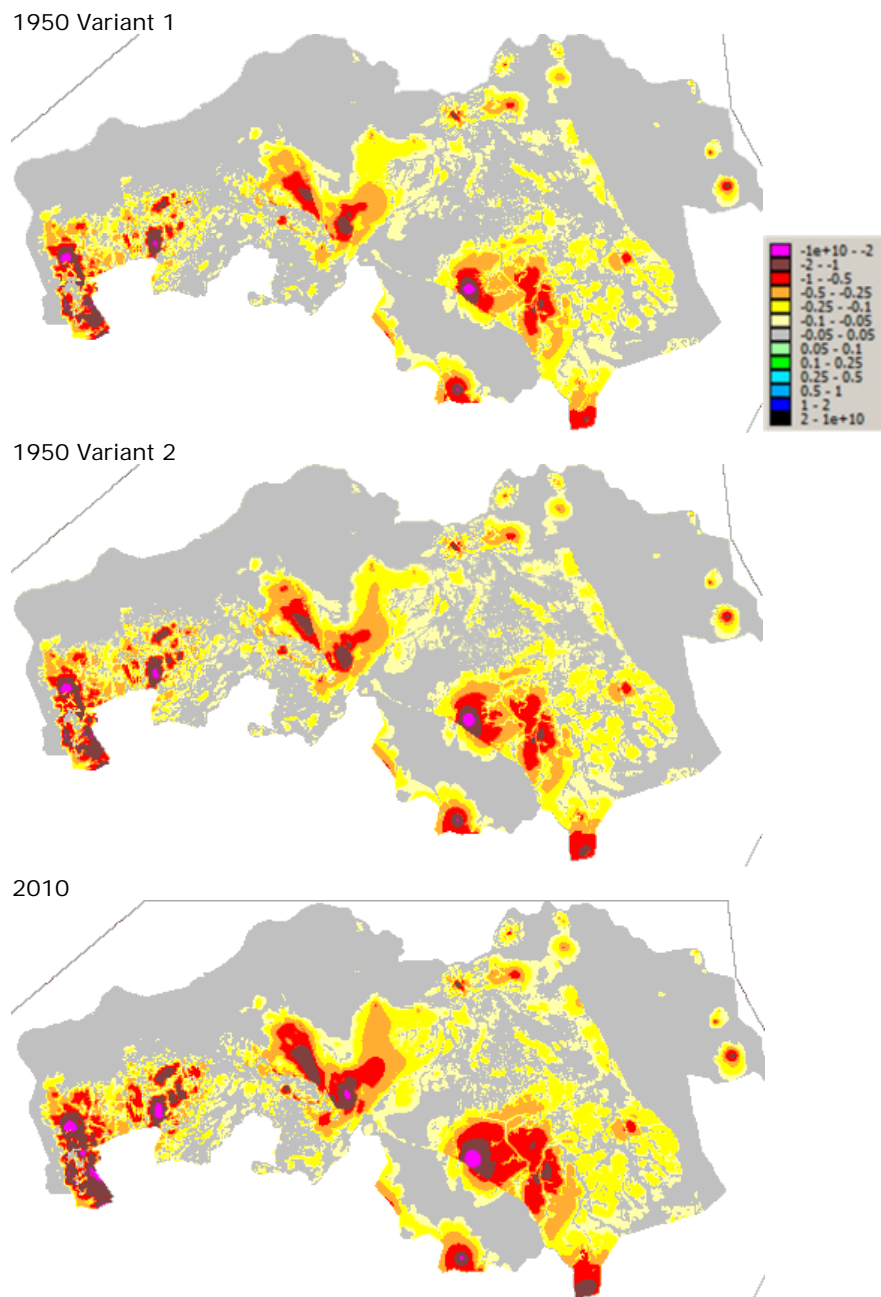
Het effect van grondwaterwinningen hangt mede af van de grondwateraanvulling. Een winning met het landgebruik van 1950 heeft dus andere gevolgen dan een winning met het landgebruik van 2010. In verband met de berekening van door winning veroorzaakte schade, vooral aan de landbouw, is dit een belangrijk gegeven. Waarop, immers, moet een dergelijke

berekening worden gebaseerd: op het huidige landgebruik, of op het landgebruik ten tijde van het in werking treden van de winning? Evenzo is het van belang bij het beoordelen van maatregelen ter verbetering van de waterhuishouding van een gebied, rekening te houden met de aanwezigheid van grondwaterwinningen. Doet men dat niet, dan komt men tot suboptimaal waterbeheerplan. De volgtijdelijkheid van veranderingen in het watersysteem bepaalt dus de uitkomsten. We raken hier een discussie waar we verder niet op ingaan, maar tonen hier alleen hoe de aanvulling het effect van de grondwaterwinning (voor drinkwater en industrie) beïnvloedt: dat neemt aanzienlijk toe naarmate de aanvulling kleiner is (Figuur 6-4). Met andere woorden: de door de winning veroorzaakte daling is groter naarmate de gewasproductie in de landbouw, de verstedelijking en de verruiging en bebossing van natuurgebieden toenemen.

Op de zandgronden van de provincie Noord-Brabant (regio's 3, 5, 8, 10) bedraagt de gemiddelde daling door grondwaterwinning 13 cm onder het landgebruik van 1950 en variant 15 cm onder 1950 variant 2, en 21 cm onder het landgebruik van 2010. De winning heeft gemiddeld een vorm van een steile onttrekkingskegel (Figuur 6-3) en vindt vooral plaats op de hogere zandgronden met Gt VII. Een gemiddelde daling zegt daarom niet zoveel over potentiële schade aan landbouw en natuur van de winningen; daarvoor is de mediaan een betere maat. Deze bedraagt op de zandgronden van de provincie respectievelijk 4, 5 en 7 cm.



Figuur 6-3. Cumulatieve verdeling grondwaterstandsverlaging door alle grondwateronttrekkingen in de hele provincie Noord-Brabant bij de grondwateraanvulling van 2010. De mediaan bedraagt 4 cm.



Figuur 6-4. Door grondwaterwinning veroorzaakte daling (m) van de grondwaterstand onder drie varianten van grondwateraanvulling.

7 Discussie

7.1 Bespreking resultaten

7.1.1 Gevolgen van veranderingen in landgebruik en gewasopbrengsten

In deze studie hebben we aannemelijk gemaakt dat veranderingen in het landgebruik en de toename van de gewasopbrengsten in de landbouw veroorzakers zijn van een structurele daling van de grondwaterstand sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw. Volgens onze berekening (Hoofdstuk 6) komt de daling neer op gemiddeld 23-33 cm in 60 jaar tijd (1950-2010) in het zandlandschap van de provincie Noord-Brabant.

Wij berekenden dat de laagste grondwaterstand (*GLG*) meer is gedaald door deze oorzaken dan de hoogste grondwaterstand (*GHG*). Dat is logisch omdat de verdampingstoename door hogere opbrengsten zich vooral manifesteert tijdens het groeiseizoen. Knotters & Jansen (2005), echter, vonden dat zowel de *GHG* als de *GLG* sinds de jaren vijftig (vdve) in het zandlandschap van Nederland in gelijke mate zijn gedaald, en wel met ongeveer 30 cm. Het lijkt ons aannemelijk dat deze *GHG* daling veroorzaakt is door de massaal uitgevoerde cultuurtechnische werken, die vooral ten doel hadden wateroverlast te voorkomen.

Uit onze berekeningen komt de landbouw naar voren als de grootste veroorzaker van de verminderde grondwateraanvulling (Hoofdstuk 4). Omdat echter het bebouwde oppervlak is toegenomen ten koste van landbouwgrond, is de uitbreiding van bebouwd gebied een net zo belangrijke, zo niet grotere veroorzaker van de gebiedsgemiddelde daling van de grondwaterstand in de provincie. Deze conclusie is echter met zeer grote onzekerheden omgeven, omdat er heel weinig bekend is over de grondwateraanvulling in bebouwd gebied, vooral door gebrek aan betrouwbare verdampingscijfers.

Van de hiervoor genoemde verlaging van 23-33 cm is het laagste getal mogelijk te conservatief, en het hoogste getal vrijwel zeker te hoog, althans wanneer we alleen de onzekerheid in de verdampingstoename door de landbouw in beschouwing nemen. Het getal van 22 cm is gebaseerd op de vuistregel van dr. ir. Jan van Bakel dat de toename van de gewasopbrengst tussen 1950 en 2010 slechts voor de helft tot uitdrukking komt in de toename van de transpiratie (§ 4.4). Dat komt doordat er vroeger minder efficiënt werd geproduceerd (meer oogstverliezen en onkruid, lagere aandeel oogstbaar product). Volgens de laatste auteur van dit rapport, agronoom dr. ir. Frans Aarts, overschat deze vuistregel echter de gevolgen van een minder efficiënte bedrijfsvoering.

7.1.2 Effecten van volgtijdelijkheid

De gesimuleerde effecten van ingrepen in de waterhuishouding hangen af van de volgorde waarin die ingrepen worden berekend. Om dit verschijnsel te illustreren onderzochten we wat de gevolgen van alle grondwaterwinningen in Noord-Brabant zijn bij drie verschillende varianten van de grondwateraanvulling (§ 6.3). In de variant met de grootste grondwateraanvulling (variant 1, 1950) was de gemiddelde daling 10 cm. In die met de laagste grondwateraanvulling (2010) bedroeg de gemiddelde grondwaterstands daling 15 cm, en de mediane daling nog geen 4 cm. Het effect van de winning neemt dus toe met een afnemende grondwateraanvulling. In andere woorden: naarmate de gewasproductie in de landbouw toeneemt en het stedelijk gebied uitbreidt, resulteert grondwaterwinning in een grotere daling van de grondwaterstand. Dit komt doordat bij een lagere aanvulling meer greppels, drains en sloten tijdelijk of permanent droog staan, zodat de drainageweerstand toeneemt (Van den Akker, 2013). Dat de volgtijdelijkheid van ingrepen het berekeningsresultaat beïnvloedt, is van belang voor ingreep-effectstudies, vooral als aan de resultaten van die studies maatschappelijke of financiële consequenties worden verbonden.

7.1.3 Vergelijking met verwante onderzoeken

Ons onderzoek naar de effecten van toegenomen gewasproductie is niet nieuw. Het begon met C.T. de Wit, die in 1958 met zijn prachtige publicatie *Transpiration and crop yields* aantoonde dat de transpiratie recht-evenredig toe neemt met de gewasproductie.

Maas *et al.* (1991) proberen voor het eerst, voor zover wij weten, de effecten van de toegenomen gewasproductie in Nederland op de verdamping en de grondwaterstand te kwantificeren. Deze auteurs komen tot een toename van de werkelijke verdamping van 72-128 mm/jr over de periode 1950-1988 (34 jr). Wanneer we dit lineair extrapoleren van 1955 naar 2010 (56 jr) bedraagt de range 119-211 mm/jr². In deze schattingen is geen rekening gehouden met de hiervoor genoemde vuistregel van Van Bakel. Op basis van een vergelijkbare berekening voor Noord-Brabant (variant 1) komen wij over 1950-2010 tot 157 mm/jr (Figuur 4-3), wat binnen de bandbreedte van de lineaire extrapolatie ligt. Door de verdampingstoename te delen door een freatische bergingscoëfficiënt van 0.2 komen de auteurs voor het zandlandschap uit op een grondwaterstands daling aan het einde van het groeiseizoen van gemiddeld 36-56 cm (1950-1988), uiteenlopend van 36 cm voor gras tot 75 cm voor maïs. De berekening houdt, anders dan onze studie, noch rekening met bodem- en interceptieverdamping, noch met de nalevering van bodemvocht aan het gewas (uitgaande van een evenwichtsprofiel vertalen de auteurs de verdampingstoename via de bergingscoëfficiënt rechtstreeks naar de daling van de grondwaterstand).

Een zeer gedegen analyse is toegepast door Van Bakel & De Wit (1995) op een aardappelveld in de Noordoostpolder. Met behulp van een gekoppeld model voor waterstroming en gewasgroei, SWACROP, vertalen ze de met 40% toegenomen gemeten opbrengst in de periode 1955-1987 (33 jr) via drie methoden naar een toegenomen verdamping. Ze komen daarbij uit op 76, 74 en 43 mm/jr. De eerste twee simulatieresultaten blijken vervolgens vergelijkbaar met de 69 mm/jr die ze vinden als restpost van een waterbalans. Lineair geëxtrapoleerd naar 2010 komt deze 'meting' neer op 117 mm/jr. In onze studie vonden we, gemiddeld over de provincie, een toename van de verdamping van aardappelen van 102 mm/jr (variant 2, met de Van Bakel factor) en 203 mm/jr (variant 1) (Tabel 4-2). Ons resultaat van variant 2 zit dus in de buurt van wat Van Bakel & De Wit (1995) vonden. Voor Noord-Brabant is echter een grotere toename van de verdamping te verwachten omdat in deze provincie sinds 1955 meer aan de productieomstandigheden in de landbouw kon worden verbeterd dan in de Noordoostpolder. De daling van de grondwaterstand wordt door Van Bakel & De Wit (1995) in de peilbeheerste Noordoostpolder becijferd op 5-24 cm.

Ten slotte het onderzoek van Aarts & Degenhart (1996), waarop onze studie is geïnspireerd. Dat meldt een verdampingstoename tussen 1952 en 1992 (41 jr) per hectare landbouwgrond in de provincie Noord-Brabant van gemiddeld 91 mm/jr (variant 1). Wij komen in onze simulatieperiode (61 jr) tot een toename van 155 mm/jr (Tabel 4-2). Anders dan onze studie hebben Aarts & Degenhart (1996) niet apart bodem- en interceptieverdamping onderscheiden. Ook zijn ze niet toegekomen aan de berekening van de daling van de grondwaterstand.

7.1.4 Beperkingen deze studie

In deze studie hebben we ons bezig gehouden met de vraag wat de gevolgen zijn geweest van veranderingen in landgebruik en gewasopbrengst op de grondwaterstand in Noord-Brabant. Oorzaken zoals de vernieling van weerstand biedende kleilagen bij de aanleg van wegen, gebouwen en kanalen zijn dus buiten beschouwing gelaten. Dat geldt ook voor de effecten op de grondwaterstand van cultuurtechnische ingrepen, die na de Tweede Wereldoorlog op grote schaal zijn uitgevoerd. Deze ingrepen hadden vooral ten doel wateroverlast te voorkomen zodat de grond eerder kon worden bewerkt, de bodem vroeger in het jaar opwarmde en er minder natschade aan het gewas ontstond. Omdat een belangrijk resultaat was dat de gewasopbrengst omhoog ging, is het effect van cultuurtechnische ingrepen impliciet, maar voor een onbekend gedeelte, in onze berekening meegenomen.

² (56/34)*72=119, (56/34)*128=211

De gevolgen voor de grondwaterstand van cultuurtechnische ingrepen op de zandgebieden in Noord-Brabant zijn overigens via enkele vuistregels geschat door de Landinrichtingsdienst (1988). Op basis van de resultaten kan een gemiddelde daling van de *GHG* worden berekend van 24 cm, en van de *GLG* van 8 cm (Tabel 7-1). De projecten waren deels nog in uitvoering en de resultaten zijn, wegens de in beschouwing genomen kortere tijdspanne, niet goed vergelijkbaar met de resultaten van onze studie. Nochtans laten ze zien dat door de cultuurtechnische werken vooral de *GHG* is verlaagd, maar dat daardoor ook de *GLG* substantieel lager is geworden.

Tabel 7-1. Samenvatting resultaten studie Landinrichtingsdienst (1988). Zie Figuur 7-1 voor ligging projecten.

No.	Project	Jaren van uitvoering	Opp. (ha)	daling (cm)	
				<i>GHG</i>	<i>GLG</i>
1	Bossche Broek	1959-1975	2400	-30	-10
2	Astense Aa	1964-1975	7800	-25	-5
4	Bakel	1974-1987	7600	-30	-15
5	Bergeijk	1964-1975	5800	-10	-5
6	Boekel	1964-1972	2700	-10	0
8	Dorp en Eind	1958-1970	1600	-20	-10
10	Gilze-Bavel-Rijersbroek	1978-1984	6700	-25	-15
11	Groote Peel	1961-1969	860	-10	0
12	Kleine Aa	1959-1967	1670	-20	-10
13	Haagsche Beemden	1966-1971	2700	-30	-15
15	Heusden-Vlijmen	1962-1976	8900	-30	-10
17	Lieshout	1973-1981	1700	-10	0
18	Leygraaf	1970-1977	5900	-25	5
19	Middelbeers	1966-1970	1850	-25	-10
21	Mierlo	1971-1975	2000	-25	-5
22	Milheeze	1966-1970	490	-15	-5
24	Oirschot-Best	1968-1986	5100	-20	-10
25	Oploo	1976-1986	4450	-25	0
28	Princenhage-Noord	1972-1975	290	-30	-20
29	Ouwervelden	1961-1965	910	-30	-20
31	Mierde	1972-1974	5900	-25	-10
33	Schaft	1978-1984	2250	-15	-5
34	Strijper Aa - Budel	1973-1981	5500	-25	-10
35	Uden	1973-1978	3750	-20	-10
36	Veghel-Erp	1968-1982	5100	-25	-10
37	Wanroij	1969-1977	4200	-30	15
38	Zaligheden Oost	1968-1976	4950	-25	-10
39	Zaligheden West	1968-1974	4350	-25	-10
40	Westland	1958-1966	1850	-30	-20
41	Zuiderafwateringskanaal Beneden Donge	1978-1982	9400	-20	-10
Gemiddeld				-24	-8

De gevolgen van de uitbreiding van verhard oppervlak en van het dichtgroeien van natuurgebieden konden in deze studie niet goed worden gekwantificeerd. Bovendien zijn we er niet aan toegekomen de volgtijdelijkheid van grondwaterwinning en grondwateraanvulling door te rekenen met het waterbeheerstelsel van 1950, maar we vermoeden dit weinig had uitgemaakt voor de berekende grondwaterstands daling. Van de ene kant gaat in een natte, slecht ontwaterde situatie, die vroeger op grotere schaal voorkwam, een verdampingstoename eerst ten koste van een verminderde afvoer van oppervlaktewater waardoor het effect op de grondwaterstand beperkt blijft. Van de andere kant leidt een minder intensief ontwateringsstelsel, dat er in 1950 was, tot een hogere drainageweerstand,

gedaald, in het westen van het land tot ver beneden zeeniveau; voor de bruinkoolwinning in Duitsland zijn reusachtige gaten in de aarde geslagen, die voortdurend moeten worden drooggemalen, met een uitstraling tot ver tot over de landgrens heen; natuurgebieden zijn dichtgegroeid met grassen, bomen en struiken; de gewasproductie in de landbouw is enorm gestegen. Deze wirwar aan veranderingen hebben geleid tot een systematische daling van de grondwaterstand van Nederland. Wanneer niet alle oorzaken zorgvuldig zijn geïnventariseerd en gekwantificeerd, bestaat natuurlijk het gevaar dat met hydrologische modellen een gedeelte van de gemeten grondwaterstandsverlaging niet kan worden verklaard: de achtergrondverlaging. Een andere consequentie kan zijn dat een onevenredig deel van de geconstateerde verlaging wordt toegekend aan de wel in beschouwing genomen oorzaken.

Om dus het verleden goed te kunnen reconstrueren zijn langjarige meetreeksen nodig en zorgvuldige registraties van alle veranderingen die in het landschap hebben plaatsgevonden. Dan moeten er natuurlijk wel metingen zijn, maar helaas zijn vooral metingen van de belangrijkste verliesposten, verdamping en afvoer van oppervlaktewater, vaak afwezig of zeer gebrekkig. De verdampingsvraag van vooral steden is zelfs nauwelijks bekend, hoewel daar recent in een paar steden kortstondig aan is gemeten (Jacobs *et al.*, 2015). Tevens is onze kennis over de verdamping van droogteminnende vegetaties gebrekkig, maar ook daaraan zijn recent metingen gestart (Voortman *et al.*, 2013; Voortman *et al.*, 2015; Voortman *et al.*, submitted).

Wij kunnen hier wel pleiten voor meer metingen, maar voor het oplossen van de vraag waardoor de achtergrondverlaging is veroorzaakt schieten we daar voorlopig niet veel mee op. Daarom stellen we hier de volgende drie op korte termijn te realiseren onderzoeken voor:

1. Onderzoek naar de gevolgen van veranderingen, sinds ca. 1950, in landgebruik en in gewasopbrengsten in een typisch agrarisch zandlandschap ter grootte van 100-1000 km² waar andere invloeden, zoals verstedelijking, zoveel mogelijk kunnen worden genegeerd. Het vraagstuk van achtergrondverlaging heeft immers vooral betrekking op het landelijk gebied (landbouw en natuur), dus is het verstandig een gebied te selecteren waar andere oorzaken niet belangrijk zijn. In dit onderzoek ligt de nadruk op veranderingen in de landbouw. Betrek in dit onderzoek ook toekomstprojecties, met name de mogelijke consequenties van klimaatverandering.
2. Onderzoek naar de gevolgen van het dichtgroeien van droge natuurgebieden met grassen, struiken en bomen. Droge natuurgebieden hebben wegens hun omvang vaak een traag reagerend grondwatersysteem en de veranderingen in landgebruik (staken beweiding door schapen, aanplant van naaldhout) vonden vooral voor WOII plaats. Daarom zouden veranderingen in zowel de 19^e als de 20^e eeuw in het onderzoek betrokken moeten worden. Gebruik dit onderzoek om de waterhuishouding van het onderzoeksgebied te reconstrueren en via modellering na te bootsen. Als dat goed gaat kunnen met het hydrologische model de gevolgen van klimaatverandering worden gesimuleerd.
3. Een gevoeligheidsanalyse naar de effecten van landgebruiksveranderingen op de met hydrologische modellen (mechanistische en tijdreeksmodellen) berekende grondwaterstands daling door grondwaterwinning. Een dergelijke analyse biedt inzicht in de gevolgen van zowel de volgtijdelijkheid als van het negeren van landgebruiksveranderingen. Eventueel te combineren met de vorige twee onderwerpen.

7.3 Conclusies

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

1. Sinds 1950 hebben veranderingen in landgebruik en stijging van gewasopbrengsten geleid tot een structurele daling van de grondwaterstand in de provincie Noord-Brabant. Wanneer met deze oorzaken geen rekening wordt gehouden komen hydrologische berekeningen tot een verlaging van de grondwaterstand die minder is dan de metingen uitwijzen. Het verschil wordt 'achtergrondverlaging' genoemd.
2. Per type landgebruik, dus per hectare, is de toename van de gewasopbrengst de belangrijkste veroorzaker van de achtergrondverlaging.
3. Het areaal bebouwd gebied in de provincie is sinds 1950 enorm gestegen ten koste van het areaal landbouwgrond. Daardoor is, volgens onze berekeningen, de toename van het areaal bebouwd gebied een minstens even grote, en waarschijnlijk grotere, veroorzaker van de gemiddelde achtergrondverlaging in de provincie.
4. Over de grondwateraanvulling van stedelijk gebied is echter heel weinig bekend, vooral door gebrek aan betrouwbare verdampingscijfers. Ook de grondwateraanvulling van natuurgebieden hebben we slecht kunnen kwantificeren.
5. De grondwaterstands daling door grondwaterwinning neemt toe naarmate de grondwateraanvulling afneemt, dus naarmate de opbrengsten in de landbouw stijgen. De volgtijdelijkheid van de ingrepen in de waterhuishouding bepalen dus de resultaten van hydrologische modellen. Overwogen dient te worden hiermee voortaan rekening te houden in effectstudies.
6. Veranderingen in landgebruik en gestegen gewasopbrengsten hebben vooral geleid tot een daling van de laagste grondwaterstand (*GLG*); cultuurtechnische ingrepen hebben vooral de hoogste grondwaterstand (*GHC*) omlaag getrokken.
7. Op basis van onze studie schatten wij dat minimaal de helft (conservatieve schatting) van de achtergrondverlaging in het zandlandschap van de provincie Noord-Brabant (gemiddeld ca. 3 dm) kan worden verklaard door veranderingen in landgebruik en gestegen gewasopbrengsten. Feitelijk bestaat na deze studie dit deel van de onverklaarbare verlaging niet meer: het is 'opgelost'.

Referenties

- Aarts, H.F.M. & Degenhart, N., 1996. *De invloed van ontwikkelingen in de Brabantse landbouw op het waterverbruik*. AB-DLO, Wageningen.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Anonymous, 2012. *LGN6*. Available at: <http://www.wageningenur.nl/nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/Alterra/Faciliteiten-Producten/Kaarten-en-GISbestanden/Landelijk-Grondgebruik-Nederland/LGN6.htm> (accessed 2015).
- Anonymous, 2014. *Grondwatermodellering effectenberegeningsbeleid Noord-Brabant. Technisch achtergronddocument*. Royal HaskoningDHV.
- CoGroWa, 1984. *Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking*. Commissie Grondwaterwet waterleidingbedrijven - werkgroep Landbouwkundige aspecten, Utrecht.
- De Graaf, R.E., Roeffen, B., Den Ouden, T. & Souwer, B., 2013. *Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden*. DeltaSync BV, Delft.
- Dolman, H., Moors, E., Elbers, J., Snijders, W. & Hamaker, P., 2000. *Het waterverbruik van bossen in Nederland*. Alterra, Wageningen.
- Horst, M. & Spek, T., 2011. Het Leenderbos en de Groote Heide: Ontginningsbossen bovenop een eeuwenoud cultuurlandschap. *In Brabant, Tijdschrift voor Brabants Heem en Erfgoed*, **6**, 34-55.
- Jacobs, C., Elbers, J., Brolsma, R., Hartogensis, O., Moors, E., Rodríguez-Carretero Márquez, M.T. & van Hove, B., 2015. Assessment of evaporative water loss from Dutch cities. *Building and Environment*, **83**, 27-38.
- Jansen, P.C., 1986. *De potentiële verdamping van (half-) natuurlijke vegetaties*. ICW, Wageningen.
- Knotters, M. & Jansen, P.C., 2005. Honderd jaar verdroging in kaart. *Stromingen*, **11**, 19-32.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Jacobs, C.M.J., 2008. *SWAP version 3.4, Theory description and user manual*. Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- Landinrichtingsdienst, 1988. *Indicatieve kwantificering van effecten van cultuurtechnische ingrepen in de periode 1955-1985 op freatische grondwaterstanden in het zandgebied van de provincie Noord-Brabant*, p. 11. Landinrichtingsdienst, Tilburg.
- Luijendijk, J., Goijer, I., Heuven, A. & Runhaar, H., 2010. *Zoetwatervoorziening Oost Nederland*, p. 90. Tauw b.v., Deventer.
- Maas, C., 2012. Het geval Terwisscha. *Stromingen*, **18**, 43-76.
- Maas, C., Baggelaar, P.K., Van der Velde, G., Jalink, M.H. & Jansen, A.J.M., 1991. *Waterwinning en verdroging*. KIWA N.V., Nieuwegein.
- Olsthoorn, T., 2014a. Tussen De Glee en Dupuit, revisited. *Stromingen*, **20**, 35-55.
- Olsthoorn, T., 2014b. De dynamica van de verlaging van Terwisscha of in vergelijkbare situaties. *Stromingen*, **20**, 15-33.
- Ovaa, A.H., 1990. *Verdamping in natuurgebieden : een literatuurstudie naar de achtergronden van verdamping in (half-) natuurlijke vegetaties*. Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Rolf, H.L.M., 1989. *Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland: analyse periode 1950-1986* (ed. by M.V.V.E. Waterstaat). DGV-TNO, 's-Gravenhage.
- Spieksma, J.F.M., Dolman, A.J. & Schouwenaars, J.M., 1997. De verdamping van natuurterreinen. *Stromingen*, **3**, 5-16.
- Stuurman, R., Baggelaar, P.K., Hendriksen, G., Van Schrojenstein Lantman, R. & Van Oostrom, N., 2010. *Inschatting van de kleine grondwateronttrekkingen in de provincie Noord-Brabant*, p. 26. Deltares, Utrecht.

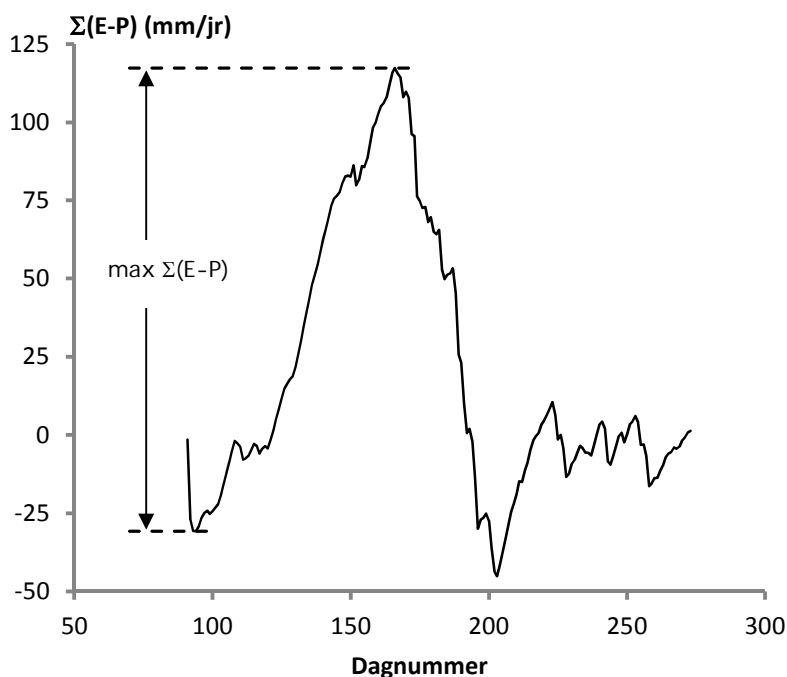
- Van Bakel, P.J.T., 2012. De voedings-voetafdruk van ons drinkwater. Een alternatieve beschouwing over effecten van permanente grondwateronttrekkingen op verdamping en afvoer. *Stromingen*, **18**, 57-70.
- Van Bakel, P.J.T. & De Wit, P.A.J.W., 1995. Zijn de toegenomen landbouwopbrengsten een der oorzaken van de verdroging in Nederland? *H2O*, **28**, 771-773.
- Van Boheemen, P.J.M., 1980. *Seizoen- en piekbehoefte aan kunstmatige watervoorziening bij gras-, aardappelen en tuinbouwgewassen*. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, **7**, 640-653.
- Van den Akker, C., 2013. Tussen Dupuit en De Glee: Het ontstaan van de Toegevoegde Stijghoogteverlaging. *Stromingen*, **19**, 5-23.
- Van den Akker, C., 2014a. Een fysische onderbouwing van de overdrachtsfactor. *Stromingen*, **20**, 5-13.
- Van den Akker, C., 2014b. Tussen Theis en Hantush. *Stromingen*, **20**, 37-42.
- Van der Gaast, J., 2012. Numerieke verdroging en schadeonderzoek voor grondwateronttrekkingen. *Stromingen*, **18**, 21-34.
- Van der Gaast, J., 2013. Grondwaterwinningen nader beschouwd. *Stromingen*, **19**, 63-81.
- Van der Wal, B.J., 2014. Ontwikkeling Brabants grondwatermodel tot kennisstelsel. *H2O-online*.
- Van Geer, F.C. & Lourens, A., 2001. *Trends in de stijghoogte en relatie tussen verschillende dieptes*. NITG-TNO, Delft.
- Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., Bosveld, F. & Witte, J.P.M., submitted. Improving the performance of lysimeters with the aid of thermal imaging. *Water Resources Research*.
- Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., van der Zee, S.E.A.T.M., Bierkens, M.F.P. & Witte, J.P.M., 2015. Quantifying energy and water fluxes in dry dune ecosystems of the Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **19**, 3787-3805.
- Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., van Bodegom, P.M., Gooren, H., van der Zee, S.E.A.T.M. & Witte, J.-P.M., 2013. Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: towards implementation of moss covered soils in hydrological models. *Hydrological Processes*, n/a-n/a.
- Vroege, M. & Hoijtink, R., 2013. *Waterrapportage Noord-Brabant*, p. 54. Waterschap Aa en Maas, waterschap Brabantse Delta, waterschap De Dommel, waterschap Rivierenland, provincie Noord-Brabant.
- VVV_de_Brabantese_Kempen, z.j.t. Available at:
<http://www.vvdebrabantsekempen.nl/detail/landschotse+heide?item=5267403c-293f-4194-9944-32832fd2905c> (accessed 2015).

Bijlagen

Bijlage I Droogtegraad jaren

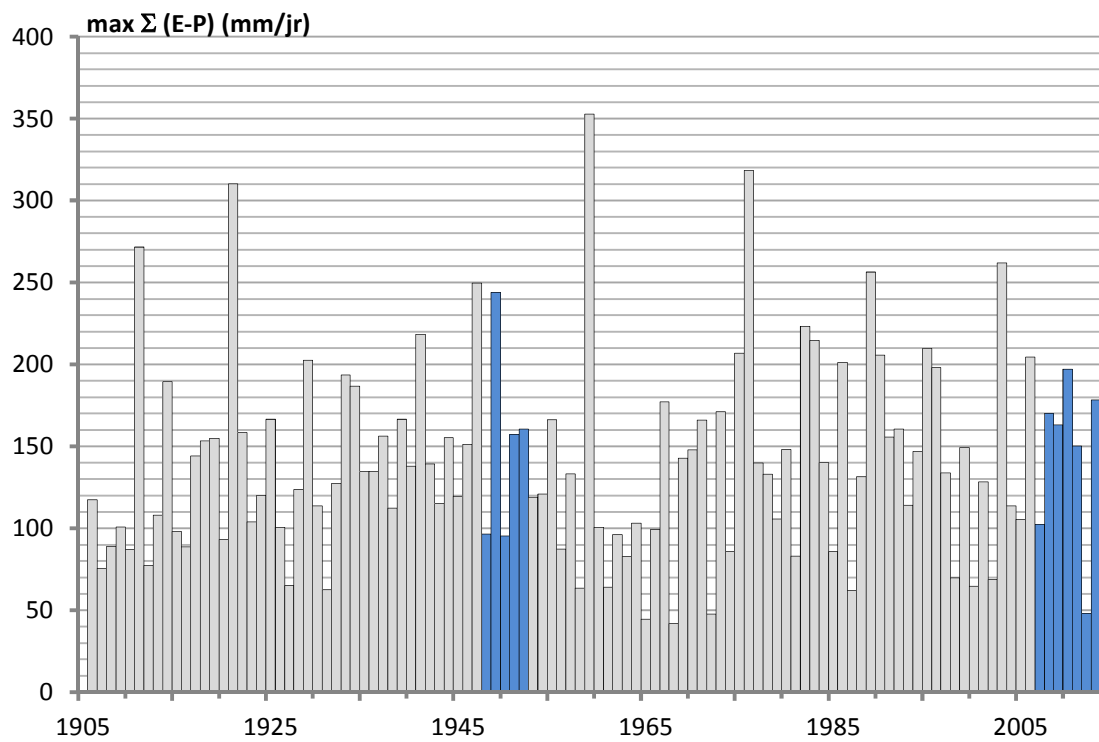
Gewasopbrengsten zijn mede afhankelijk van de weersomstandigheden. Voor de vergelijking is het daarom noodzakelijk dat de jaren 1948-1952 qua weersomstandigheden vergelijkbaar zijn, of in ieder geval niet gunstiger, dan de jaren 2009-2013. Alleen dan kunnen we immers de toegenomen gewasopbrengsten werkelijk toeschrijven aan verbeterde productiemethoden, en het weer als oorzaak van die toename uitsluiten.

De beste landbouwkundige maat om de droogtegraad van een jaar te karakteriseren is het maximale cumulatieve verdampingoverschot in een aaneengesloten periode binnen het groeiseizoen, waarmee de derving der gewasopbrengsten een heel goed lineair verband vertoont (Van Boheemen, 1980; CoGroWa, 1984). Figuur I-1 illustreert de berekeningswijze voor het jaar 1980. Voor de jaren 1906-2013 hebben we deze grootte berekend (Figuur I-2)³. Het resultaat (**Error! Reference source not found.**) laat zien dat de geselecteerde jaren zeer goed vergelijkbaar zijn: het maximale cumulatieve overschot bedraagt in de periode 1948-1952 gemiddeld 151 mm, en 144 mm in de periode 2007-2013.



Figuur I-1. Berekening van het maximale cumulatieve verdampingoverschot in een aaneengesloten periode. Op de y-as staat de som van de Makkink-verdamping minus de neerslag vanaf 1 april 1980.

³ Omdat de referentieverdamping voorafgaand aan het jaar 1950 niet door het KNMI wordt verstrekt, hebben we die voor de hele periode berekend met de vergelijkingen van Allen *et al.* (1998) op basis de volgende beschikbare dagelijkse meteorologische waarnemingen te De Bilt: neerslag, minimum- en maximumtemperatuur, uren zonneshijn, en windsnelheid.



Figuur 1-2. Het maximale cumulatieve verdampingsoverschot over de jaren 1906-2013. In blauw de vergelijkingsjaren.

Bijlage II Indeling in nieuwe regio's

Sinds begin jaren negentig hebben grote gemeentelijke herindelingen plaatsgevonden. Gemeenten die in de oude indeling in twee verschillende regio's vielen zijn ondertussen samengevoegd.

Om de oude en nieuwe indeling op elkaar te laten aansluiten hebben we een aantal wijzigingen doorgevoerd ten opzichte van de regio-indeling van Aarts & Degenhart (1996). Met deze aanpassingen zijn de nieuwe, samengevoegde, gemeentes op dezelfde manier naar regio's in te delen als de oude regio's. Behalve het verplaatsten van gemeenten van de ene naar de andere regio, zijn de regio's 'Land van Breda' en 'Westelijke zandgronden' samengevoegd (Tabel II-1, Figuur II-1).

Tabel II-1. Aanpassingen van indeling gemeentes naar regio's.

Gemeente (in 1994)	Van:	Naar:
	Oude regio-indeling	Nieuwe regio-indeling
Rosmalen	Westelijk Peelgebied	Oostelijke Langstraat
Berlicum	Westelijk Peelgebied	Midden Noord-Brabant
Geldrop	Midden Noord-Brabant	Westelijk Peelgebied
Heeze	Midden Noord-Brabant	Westelijk Peelgebied
Drunen	Midden Noord-Brabant	Oostelijke Langstraat
Moergestel	De Kempen	Midden Noord-Brabant
Oost en west Middelbeers	De Kempen	Midden Noord-Brabant
Waspik	Westelijke Langstraat	Oostelijke Langstraat
Teteringen	Westelijke Langstraat	Westelijke zandgronden
's gravenmoer	Westelijke Langstraat	Midden Noord-Brabant
Nieuw Ginneken	Land van Breda	De Kempen
Rijsbergen	Land van Breda	Westelijke zandgronden
Zundert	Land van Breda	Westelijke zandgronden
Standaarbuiten	Niet ingedeeld	Noordwesthoek



Figuur II-1. Oude regio-indeling van de gemeenten in 1994 door Aarts & Degenhart (1996) (in kleur), met nieuwe regio-indeling in 2010 (rode lijnen).

Bijlage III E-mails over dT ~ 0.5dY

Uit e-mail van Flip Witte aan Jan van Bakel, 12 maart 2015

Ha Jan. Je telefoon ingesproken. Vraag: geldt de regel van Van Bakel (toename gedurende 1950-2010 in Y werkt voor de helft door in toename T) ook voor grasland?

Uit e-mail Jan van Bakel aan Flip Witte, 12 maart 2015

Heb je voicemail gehoord. Als reactie daarop:

- 1. In mijn jeugd werd grasland gehooïd. Daarbij ging meer droge stof verloren omdat het gras veel verder moest drogen dan voor droogkuil. En elke bewerking leidt tot verliezen. Om maar niet te spreken over totaal verloren gaan van de hooi-oogst omdat het bleef regenen. Bovendien was tijdens de oogstperiode het gras gedeeltelijk bedekt met minder verdamping en dus minder productie tot gevolg (+).*
- 2. De huidige grassoorten zijn geselecteerd op hoge productie en dat gaat vrijwel altijd samen met hogere watergebruiksefficiency (+).*
- 3. Zomerstalvoering levert minder/geen vertrappingsverliezen maar wel berijdingsverliezen. De laatste zijn echter beperkter. Vertrapt gras heeft wel verdampt (+).*
- 4. Kale grondverdamping. Is door langer groeiseizoen en hogere bodembedekking lager geworden (-).*
- 5. N-bemesting. Bij optimale N-bemesting is water de beperkende productiefactor en watergebruik dus min of meer 1 op 1 relatie met productie. Bij N-gelimiteerde productie daalt de watergebruiksefficiency. Vroeger was de bemesting niet optimaal en nu ook weer niet ivm mestwetgeving. Ga er maar aan staan.*

(lijst is niet uitputtend)

Hoe een en ander uitpakt voor de watergebruiksefficiency is ook nu niet aan te geven maar in ieder geval wel een verbetering. Dus is toename grasproductie niet gelijk aan toename verdamping. Maar er is wel een verband dus factor 0,5 is de nulhypothese. Ik denk niet dat ik het in mijn actieve carrière nog meemaak dat die wordt verworpen.

Overigens ben ik van mening dat vanuit waterbalansen van gebieden met veel grasland en afname in afvoer te zien zou moeten zijn (a la de NOP). (gecorrigeerd voor toegenomen neerslag; waar komt die vandaan? M.i. van de toegenomen verdamping.

Uit e-mail van Flip Witte aan Frans Aarts, 13 maart 2015

Hierbij het zeer onvolledige conceptrapport. Je mag alles bekijken, maar je kan je ook beperken tot par. 3.4 en par 4.3. Dat zijn maar een paar pagina's en die gaan over de landbouw, jouw specialiteit. Als jij de werkwijze goed vindt, kunnen we de definitieve sommen gaan maken.

Uit e-mail van Frans Aarts aan Flip Witte, 14 maart 2015, n.a.v. toezending conceptrapport

Prima stuk.

Wat betreft 3.4 geen commentaar. Wat betreft 4.3 het volgende.

Jan van Bakel en ik komen uit hetzelfde dorp (Deurne) en onze vaders hebben samen nog turf gestoken.

Jan heeft op een aantal punten gelijk, maar hij schat m.i. de effecten te hoog in.

Er stond in 1950 zeker meer onkruid, dat vooral in de maanden april en mei extra water heeft verdampt, daarna zal het effect van het onkruid op de verdamping niet groot meer zijn geweest.

De 'harvest index' (oogstbaar deel van totale ds-productie) was in 1950 lager, vooral van graan en aardappelen. Dat wil zeggen dat er nu meer van de drogestof in zaad en knollen terecht komt en minder in het stro en loof. Maar omdat de transpiratiecoëfficiënt betrekking heeft op de totale ds-opbrengst speelt dit geen rol in de verdamping, die immers per kg ds wordt berekend.

De oogstverliezen waren in 1950 waarschijnlijk bij grasland hoger, maar dat kan niet meer geweest zijn dan pakweg 15%. Bij de akkerbouwgewassen kan ik geen argumenten vinden waarom de oogstverliezen hoger zouden zijn.

Er speelden nog wel enkele factoren die invloed kunnen hebben gehad:

- *Door klimaatverandering is het groeiseizoen sinds 1950 met minstens 2 weken verlengd*
- *In 1950 werd nog niet berekend. In droge tijden werd de gewasgroei vertraagd en bij ernstige droogte stierf het gewas voortijdig af, waardoor ook na de droogteperiode de verdamping laag bleef.*
- *Voortijdig (deels) afsterven gebeurde ook door ziekten bij aardappelen en graan. Bestrijdingsmiddelen voorkomen dat nu. Gewassen hebben daardoor een langere groeiperiode.*
- *In 1950 werd de groei van de gewassen beperkt door gebrek aan meststoffen*
- *In 1950 werden stoppelgewassen geteeld, waardoor de verdamping in de herfst hoger is dan op kaal land. In 2010 bleef maisland in de regel kaal liggen na de oogst. Nu is een stoppelgewas (heet nu vanggewas) verplicht.*