
Achtergrondverlaging en grondwateraanvulling in Noord-Brabant

J.P.M. Witte¹, I. Leunk², D.G. Cirkel³, H.F.M. Aarts⁴,
W.J. Zaadnoordijk⁵

Achtergrondverlaging is dat deel van de gemeten grondwaterstands daling, dat niet door hydrologische berekeningen wordt verklaard. In het Nederlandse zandlandschap bedraagt dit deel, gemeten vanaf de jaren vijftig van de vorige eeuw, gemiddeld enkele decimeters. In dit artikel laten we zien dat de achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant waarschijnlijk grotendeels is veroorzaakt door de afname van de grondwateraanvulling. Die afname hangt samen met veranderingen in het landgebruik en met een stijging van gewasopbrengsten in de landbouw.

Inleiding

Sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw is bijna overal in Nederland de grondwaterstand gedaald, vooral op de hogere zandgronden. Bij analyses van de oorzaken blijkt vaak een gedeelte van die verlaging, een paar decimeter, niet te kunnen worden verklaard. Deze restpost wordt de 'achtergrondverdroging' genoemd (Rolf, 1989), tegenwoordig 'achtergrondverlaging' geheten.

Onderzoek naar de oorzaken van achtergrondverlaging kan niet zonder de geschiedenis van het landschap te bestuderen. In de loop der tijd is er van alles aan het landschap veranderd: natte gebieden zijn drooggelegd, steden zijn uitgebreid, pompputten zijn geslagen, wegen aangelegd, kleilagen doorbroken, et cetera. Deze wirwar aan oorzaken heeft geleid tot een systematische daling van de grondwaterstand. Wanneer niet alle oorzaken zorgvuldig zijn geïnventariseerd en gekwantificeerd, bestaat natuurlijk het gevaar dat de gemeten verlaging groter is dan hydrologische berekeningen aangeven: achtergrondverlaging. In dit artikel gaan we in op een van de verklaringen van dit fenomeen: de afname, sinds de jaren vijftig, 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 omdat opbrengst en verdamping sterk positief zijn gecorreleerd (De Wit, 1958), zal dat hebben geleid tot meer gewasverdamping. Bovendien zijn natuurgebieden dichtgegroeid met grassen, bomen en struiken, die meer verdampen dan de schralere ve-

1 KWR Watercycle Research Institute en VU Amsterdam (Flip.Witte@kwrwater.nl)

2 KWR Watercycle Research Institute (Inke.Leunk@kwrwater.nl)

3 KWR Watercycle Research Institute (Gijsbert.Cirkel@kwrwater.nl)

4 Plant Research International (Frans.Aarts@wur.nl)

5 KWR Watercycle Research Institute (WillemJan.Zaadnoordijk@kwrwater.nl)

getatie die er eerst stond. Ook uitbreiding van steden en van bebouwing op het plateland kan hebben bijgedragen aan de daling van de grondwateraanvulling, doordat een groot deel van het neerslagwater in bebouwd gebied naar het riool stroomt, en dan niet meer het grondwater bereikt.

In opdracht van waterbedrijf Brabant Water onderzochten wij hoe veranderingen in het landgebruik via een afname van de grondwateraanvulling kunnen hebben bijgedragen aan de daling van de grondwaterstand in de provincie Noord-Brabant (Witte e.a., 2015). De nadruk in dit onderzoek lag op de stijging van de gewasproductie.

Veranderingen in landgebruik en gewasopbrengst

We vergeleken twee perioden met elkaar, de situatie rond 1950 en die rond 2010. Deze perioden duiden we aan als de zichtjaren 1950 en 2010. Hiervoor zochten we uit hoe het landgebruik was, en welke opbrengsten er in de landbouw werden gerealiseerd. Het landgebruik baseerden we op oude gedigitaliseerde kaarten en LGN6 (Anonimous, 2012). De opbrengststatistieken van het LEI en het CBS konden we alleen per regio (Afbeelding 1) boven water krijgen.

Overall in de provincie blijkt het areaal bebouwd gebied te zijn toegenomen, vooral ten koste van de landbouw (Tabel 1). Onder de categorie 'bebouwd' vallen woon-, bedrijfs- en bouwterreinen, inclusief tuinen, trapveldjes, parkeerplaatsen, etc. Met name in de regio's Midden Noord-Brabant, Oostelijke- en Westelijke Langstraat, en Westelijk Peelgebied is het areaal gestegen (Tabel 1). In deze regio's liggen steden die zich enorm hebben ontwikkeld, zoals Eindhoven en 's-Hertogenbosch.

Binnen de categorie 'landbouw' zijn cijfers bekend over de productie van de zogenaamde 'belangrijkste gewassen', die in 1950 samen 83 % van de totale oppervlakte aan landbouwgrond in de provincie besloegen, en in 2010 68 %. Vooral het aandeel maïs is van 1950 naar 2010 flink gestegen, ten koste van graan en, in mindere mate, van grasland (Afbeelding 2).



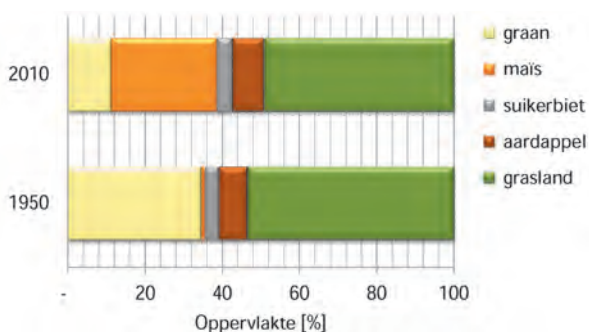
Afbeelding 1: Gebruikte indeling in regio's voor landbouwproductiecijfers.

	Aeraal [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

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

Binnen de categorie 'landbouw' is de verandering in de gewasopbrengsten aanzienlijk (Afbeelding 3, Tabel 2). 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 veel minder toegenomen.

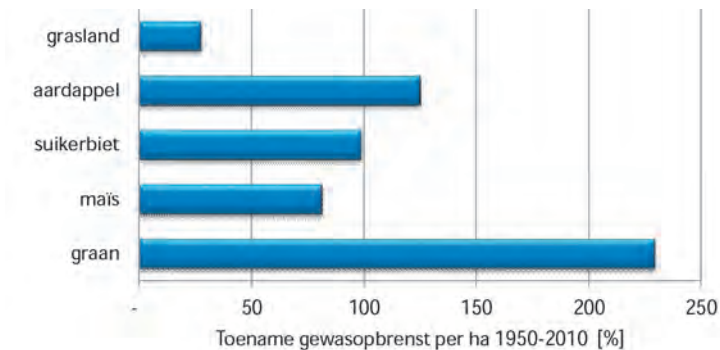
De veranderingen in de categorie 'natuur' (toename bossen) konden we lastiger achterhalen en laten we in dit artikel verder buiten beschouwing (zie Witte e.a. (2015) voor meer informatie).



Afbeelding 2: Procentuele verandering in het areaal belangrijkste landbouwgewassen in Noord-Brabant.

	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	21881	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

Tabel 2: 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.



Afbeelding 3: Procentuele verandering in de opbrengst per hectare van 1950-2010 in Noord-Brabant.

Gevolgen voor de grondwateraanvulling

Meteorologische gegevens

Om effecten van verschillen in weersgesteldheid tussen 1950 en 2010 'uit te schakelen', gebruikten we voor beide zichtjaren dezelfde gegevens over neerslag en referentiegewasverdamping, namelijk die uit 2007-2013. Verschillen in de berekende gemiddelde grondwateraanvulling (over deze zeven jaren) zijn daardoor geheel toe te schrijven aan verschillen in landgebruik en gewasopbrengst. Een veronderstelling bij deze aanpak is dat verschillen in gewasopbrengst tussen 1950 en 2010 niet samenhangen met meteorologische verschillen. Deze aanname blijkt correct te zijn (Bijlage II in Witte e.a. (2015)).

Grondwateraanvulling bebouwd gebied

Voor de categorie 'bebouwd gebied' maakten we gebruik van een recente literatuurstudie naar het waterverbruik van steden door De Graaf e.a. (2013). Deze auteurs schatten de verdamping van een gemiddelde stad in Nederland, inclusief water en groen, op 66 % van de referentieverdamping. 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 benadering voor de grondwateraanvulling in stedelijk gebied:

$$R = 0.75P - 0.66ET_{ref} \quad (1)$$

Waarbij

R : grondwateraanvulling [mm/jr]

P : neerslag [mm/jr]

ET_{ref} : referentiegewasverdamping volgens Makkink [mm/jr]

Met een gemiddelde (2007-2013) neerslag in de provincie van $P = 831$ mm/jr en een referentieverdamping van $E_{ref} = 601$ mm/jr, komen we uit op een aanvulling van $R = 226$ mm/jr. Dat is bijna evenveel als het neerslagoverschot van $P - E_{ref} = 230$ mm/jr. Omdat de werkelijke verdamping van gewassen en natuurlijke vegetaties in droge perioden vaak lager is dan ET_{ref} , is deze aanvulling aan de lage kant: van bebouwd gebied gaat, volgens vergelijking (1), een verdrogend effect uit.

Er bestaan verschillen in de intensiteit en in de 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 aanvulling. Van de andere kant waren de riolen van een mindere kwaliteit zodat ze soms grondwater draïneerden. 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. Vergelijking (1) pasten we daarom toe op zowel 1950 als 2010.

Grondwateraanvulling van natuur

De categorie 'natuur' konden we niet verder opsplitsen dan de subcategorieën 'droge open terreinen', 'natte open terreinen' en 'bossen'. Op basis van een literatuurverkenning kenden wij hieraan de zeer indicatieve cijfers voor de werkelijke verdamping toe van respectievelijk 450, 550 en 650 mm/jr. We berekenden een daling van de grondwateraanvulling van 238 naar 202 mm/jr, welke is toe te schrijven aan de uitbreiding van het areaal bos. Met behulp van het model SWAP (Kroes e.a., 2008; Van Dam e.a., 2008) leidden we transferfuncties af waarmee we deze jaarcijfers voor MODFLOW-berekeningen (zie volgende paragraaf) schaalden naar 5-daagse waarden.

Grondwateraanvulling van landbouw

Voor hun fotosynthese nemen planten CO₂ op uit de atmosfeer op door diffusie via hun huidmondjes. Tijdens die CO₂-opname verdwijnt door diffusie waterdamp uit de bladholten achter de huidmondjes naar de atmosfeer: transpiratie. De hoeveelheid gewasproductie is dan ook lineair gecorreleerd aan de hoeveelheid transpiratie (De Wit, 1958). Van dit gegeven maakten we gebruik om gegevens over de jaarlijkse productie van het oogstbare product (Tabel 2) om te zetten in cijfers over de jaarlijkse evapotranspiratie, *ET*. Dat deden we in drie stappen.

Eerst berekenden we de droge-stofproductie van de totale jaarlijkse biomassa, exclusief wortels, door de opbrengstcijfers, *Y*, te vermenigvuldigen met een droge-stofcoëfficiënt, *C_{DS}* (Tabel 3). Voor gras, maïs en klaver zijn de opbrengstcijfers in Tabel 2 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 is uitgedrukt als versgewicht, zodat de opbrengst met een coëfficiënt *C_{DS}* < 1 wordt teruggebracht naar de droge-stofproductie.

Ten tweede berekenden we de transpiratie *T* van ieder gewas door de droge-stofproductie te vermenigvuldigen met een transpiratiecoëfficiënt *C_T*. Dit is de reciproque van de 'water-use efficiency of productivity' die aangeeft hoeveel kg water er nodig is voor de productie van één kg droge stof. De jaarlijkse transpiratie wordt hiermee:

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

Waarbij

- T* : transpiratie [mm/jr]
- C_{DS}* : droge-stofcoëfficiënt [kg droge stof / kg geoogst product]
- C_T* : transpiratiecoëfficiënt [kg H₂O / kg droge stof]
- Y* : door het CBS verstrekte cijfers over de oogst [kg geoogst product /ha/jr]

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 namen 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 goed bedekt, dan is E_i hoog en E_s laag. De som ($E_s + E_i$) hebben we voor de belangrijkste landbouwgewassen gesimuleerd met SWAP. 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 (Tabel 3).

	C_{DS} [kg d.s. / kg product]	C_T [kg H ₂ O / kg d.s.]	($E_s + E_i$) [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

Tabel 3: De drie parameters waarmee de door het CBS verstrekte cijfers over de jaarlijkse oogst Y volgens vergelijking (3) kunnen worden omgezet in jaarlijkse actuele evapotranspiratie ET. Waarden voor C_{DS} en C_T uit Aarts en Degenhart (1996), waarden voor ($E_s + E_i$) uit SWAP-simulaties.

De uiteindelijke actuele grondwateraanvulling op jaarbasis wordt aldus:

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

Combineren we de provinciale opbrengstcijfers Y van Tabel 2 via deze vergelijking met de parameterwaarden uit Tabel 3, dan leidt dat, met een gemiddelde neerslag (2007-2013) van 831 mm/jr, tot de cijfers over de gemiddelde grondwateraanvulling per gewas volgens 'variant 1' in Tabel 4.

De rekenmethode is binnen de werkgroep 'achtergrondverlaging' van de Nederlandse Hydrologische Vereniging bediscussieerd. Agrohydroloog Jan van Bakel stelde toen dat de toename van de gewasopbrengst tussen 1950 en 2010 slechts voor de helft tot uitdrukking komt in de toename van de transpiratie. Dat komt doordat de landbouw tegenwoordig efficiënter produceert: in 1950 waren er meer oogstverliezen, er stond meer onkruid, en de fractie oogstbaar product van het gewas was lager. Volgens agronoom Frans Aarts echter, overschat de 'vuistregel van Van Bakel' de gevolgen van een efficiëntere gewasopbrengst (zie Witte e.a. (2015) voor de argumenten van beide deskundigen). Niettemin gebruiken wij de vuistregel voor de berekening van een tweede variant van de grondwateraanvulling, waarvan het resultaat als 'variant 2' is opgenomen in Tabel 4. Uit Tabel 4 valt niet alleen af te lezen wat het effect is geweest van de gestegen gewasopbrengst, ook kan deze tabel worden gebruikt om het gecombineerde effect van landgebruik en gewasopbrengst te berekenen. Zo heeft, volgens Tabel 4, de verandering van graan in 1950 naar maïs in 2010 geleid tot een gemiddelde daling van de grondwateraanvulling van $447 - 361 = 96$ mm/jr (variant 2) tot $591 - 361 = 233$ mm/jr (variant 1). De jaarcijfers over de grondwateraanvulling van de landbouw hebben we ruimtelijk uitgesplitst naar de landbouwgebieden binnen de in Afbeelding 1 onderscheiden regio's. Net zoals voor de categorie 'natuur' hebben we ze met behulp van SWAP ten behoeve van MODFLOW-berekeningen (volgende paragraaf) temporeel neergeschaald naar 5-daagse waarden.

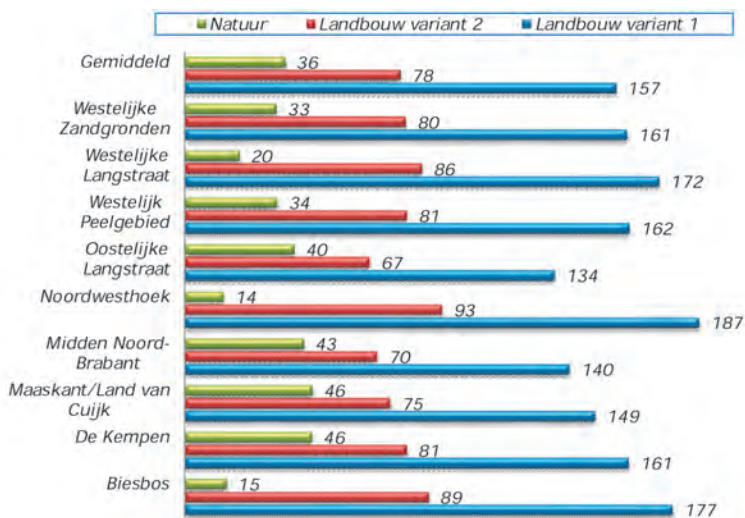
	Variant 1				Variant 2			
	Aanvulling [mm/jr]		Afname		Aanvulling [mm/jr]		Afname	
	1950	2010	[mm/jr]	%	1950	2010	[mm/jr]	%
graan	594	321	273	46	457	321	137	30
maïs	515	361	154	30	438	361	77	18
suikerbiet	511	309	202	40	410	309	101	25
aardappel	554	350	203	37	452	350	102	22
grasland	365	272	93	25	319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

Tabel 4: Grondwateraanvulling van belangrijkste landbouwgewassen in 1950 en 2010, berekend met parameterwaarden uit Tabel 3 volgens twee varianten: (1) zonder reductiefactor volgens vergelijking (3) (2) als variant 1, maar met een half zo grote transpiratietoename tussen 1950 en 2010. De laatste rij toont de naar oppervlakte gewogen gemiddelde grondwateraanvulling.

Veranderingen in de totale aanvulling

Wanneer we alle oorzaken combineren leidt dat tot een provinciegemiddelde daling van de grondwateraanvulling van 429 mm/jr volgens variant 1 en 370 mm/jr volgens variant 2 in 1950, naar 294 mm/jr in 2010. De daling is het grootst in de categorie 'landbouw', vooral door toename van de gewasproductie (Afbeelding 4), namelijk gemiddeld over de provincie ten minste 78 mm/jr (variant 2).

Dat binnen de categorie '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 1). Drukken we uit hoeveel iedere categorie 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 (Witte e.a., 2015).



Afbeelding 4: Daling van de grondwateraanvulling in de landbouw en de natuur per regio. De berekening voor 'bebouwd' is niet veranderd, zodat die categorie niet is opgenomen.

Effecten op de grondwaterstand

Met een MODFLOW-model van de provincie (Anonymous, 2014; Van der Wal, 2014) berekenden we hoe de verminderde grondwateraanvulling de grondwaterstand heeft verlaagd. Ruimtelijke en temporele resolutie van het model bedroegen respectievelijk 250 m en 5 d. Voor onze analyse legden we de grondwateraanvulling aan het model op. Zo werd de grondwaterstand gesimuleerd met de grondwateraanvulling voor 2010 en voor 1950. Het verschil is een berekende verandering van de grondwaterstand die het gevolg is van een verandering in de grondwateraanvulling.

Volgens verwachting treedt de grootste verlaging op in gebieden met weinig op-pervlaktewater, en is de daling onder variant 1 beduidend meer dan onder variant 2. De gemiddelde grondwaterstands daling in de provincie bedraagt 27 cm en 19 cm onder respectievelijk variant 1 en 2 (Tabel 5). Het begrip 'achtergrondverlaging' wordt meestal verbonden met het zandlandschap. Op de regio's die hiertoe behoren (3, 5, 8, 10) is de daling respectievelijk 33 en 23 cm. De afname van de grondwateraanvulling treedt het sterkst op in het groeiseizoen en zorgt daarom voor een grotere daling van de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) dan van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) (Tabel 6).

	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

Tabel 5: Gemiddelde verlaging van de grondwaterstand [cm] tussen 1950 en 2010 volgens de twee varianten.

	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	-16
Zandgrond (3, 5, 8, 10)	-19	-32

Tabel 6: Gemiddelde verlaging per regio van de GHG en GLG [cm] tussen 1950 en 2010 volgens variant 2.

Discussie

Gevolgen van veranderingen in landgebruik en gewasopbrengsten

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

Wij berekenden dat de GLG meer is gedaald door deze oorzaken dan de GHG. Dat is logisch omdat de verdampingstoename door hogere opbrengsten zich vooral manifesteert tijdens het groeiseizoen. Knotters en Jansen (2005) vonden echter dat zowel de GLG als de GHG sinds de jaren vijftig in het zandlandschap van Nederland in ge-

lijke mate zijn gedaald, en wel met ongeveer 3 dm. Waar wij in onze studie echter niet expliciet rekening mee hebben gehouden, zijn de massaal uitgevoerde cultuurtechnische werken. Volgens een studie van de Landinrichtingsdienst (1988) hebben die vooral geleid tot een daling van de *GHG*.

Uit onze berekeningen komt de landbouw naar voren als het landgebruik met de sterkste vermindering van de grondwateraanvulling. 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 in de provincie. Deze conclusie is echter met grote onzekerheden omgeven, omdat er weinig bekend is over de grondwateraanvulling in bebouwd gebied, vooral door gebrek aan betrouwbare verdampingscijfers.

Van de hiervoor genoemde gemiddelde 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 23 cm is gebaseerd op de vuistregel van 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.

Effecten van volgorde veranderingen op berekende grondwaterstands­daling door winningen

In zijn algemeenheid kunnen effecten van veranderingen in de waterhuishouding afhangen van de volgorde waarin die veranderingen optreden. Om dit verschijnsel te illustreren onderzochten we wat de gevolgen van alle huidige grondwaterwinningen (340 Mm³/jr, voor drinkwater, industrie en beregening) zijn bij drie verschillende varianten van de grondwateraanvulling. In variant 1, met de hoogste grondwateraanvulling (1950), bedraagt de mediane daling in het zandlandschap van de provincie gemiddeld 4 cm. In variant 2 (1950) is dit cijfer opgelopen tot 5 cm, en in de variant met de laagste grondwateraanvulling (2010) tot 7 cm. Het effect van de winning neemt dus toe met een afnemende grondwateraanvulling. Met 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 drainagemiddelen droogvallen zodat de drainageweerstand toeneemt (Van den Akker, 2013).

Vergelijking met verwante onderzoeken

Ons onderzoek naar de effecten van toegenomen gewasproductie is niet nieuw. Maas e.a. (1991) probeerden 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 kwamen 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/jr $(56/34) \times 72 = 119$, $(56/34) \times 128 = 211$). 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 155 mm/jr (Tabel 4), wat binnen de bandbreedte van de lineaire extrapolatie ligt. Door de verdampingstoename te delen door een freatische bergingscoëfficiënt van 0,2 kwamen de auteurs voor het zandlandschap uit op een grondwaterstands­daling aan het einde van het groeiseizoen van gemiddeld 36-56 cm (1950-1988). De berekening houdt, anders dan in onze

studie, geen rekening met bodem- en interceptieverdamping, noch met de nalevering van bodemvocht aan het gewas (uitgaande van een evenwichtsprofiel vertaalden de auteurs de verdampingstoename via de bergingscoëfficiënt rechtstreeks naar de daling van de grondwaterstand).

Een gedegen analyse is toegepast door Van Bakel en 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 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 validatiemeting 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) en 203 mm/jr (variant 1). Ons resultaat van variant 2 zit dus in de buurt van wat Van Bakel en 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 en De Wit (1995) in de peilbeheerste Noordoostpolder becijferd op 5-24 cm.

Beperkingen studie

Diverse factoren hebben we in deze verkennende studie niet kunnen meenemen, zoals de toename in de neerslag sinds de jaren vijftig, de verhoogde maaiveldafvoeren gevolge van bodemverdichting, en de uitbreiding van de wateraanvoer naar gebieden met watertekorten in de zomer. Oorzaken zoals de vernieling van weerstandbiedende kleilagen bij de aanleg van wegen, gebouwen en kanalen, zijn ook buiten beschouwing gelaten. Dat geldt eveneens 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.

In onze studie is tevens impliciet rekening gehouden met de beregening in de landbouw. Boeren beregenen immers hun gewassen om een hogere gewasopbrengst te bereiken. Beregening kan echter ook tot nutteloos waterverbruik leiden: water dat niet de plantenwortels bereikt, maar al verdampt voordat het ten goede komt aan het gewas. In 1950 werd er nog niet beregend terwijl de huidige beregening in de provincie jaarlijks gemiddeld 35 miljoen kubieke meter bedraagt.

De gevolgen van de uitbreiding van verhard oppervlak en van het dichtgroeien van natuurgebieden konden in deze studie niet goed worden gekwantificeerd.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Om 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.

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. In dit gebied dient de landbouw het dominante landgebruik te zijn, zodat invloeden als verstedelijking een zeer geringe tot verwaarloosbare rol spelen. 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 minder dominant zijn.
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 naaldbout) 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 grondwaterstands daling door grondwaterwinning. Een dergelijke analyse biedt inzicht in de gevolgen van zowel de volgorde waarmee veranderingen worden berekend, als van het negeren van landgebruiksveranderingen.

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.
2. Per type landgebruik heeft de landbouw door een toename van de gewasopbrengst gezorgd voor de grootste daling van de grondwateraanvulling.
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 naar oppervlakte gewogen 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 opbrengsten in de landbouw stijgen en er meer neerslag door stedelijke uitbreiding in het riool verdwijnt. De rekenvolgorde van veranderingen in de waterhuishouding bepaalt dus de resultaten van hydrologische modellen.
6. Veranderingen in landgebruik en gestegen gewasopbrengsten hebben vooral geleid tot een daling van *GLG*; cultuurtechnische ingrepen hebben volgens de Landinrichtingsdienst (1988) vooral de hoogste grondwaterstand *GHG* omlaag getrokken.
7. Op basis van onze studie schatten wij dat minimaal de helft van de achtergrondver-

laging 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'.

Literatuur

Aarts, H.F.M. en N. Degenhart (1996) De invloed van ontwikkelingen in de Brabantse landbouw op het waterverbruik. AB-DLO.

Anonymous (2012) LGN6, vol. 2015.

——— (2014) Grondwatermodellering effectenberegenningsbeleid Noord-Brabant. Technisch achtergronddocument. Royal HaskoningDHV.

De Graaf, R.E., B. Roeffen, T. Den Ouden en B. Souwer (2013) Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden. DeltaSync BV.

De Wit, C.T. (1958) Transpiration and crop yields; Pudoc, Wageningen.

Knotters, M. en P.C. Jansen (2005) Honderd jaar verdroging in kaart; in: *Stromingen*, vol 11, no 4, pag 19-32.

Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs (2008) SWAP version 3.4, Theory description and user manual. Wageningen University and Research Centre.

Landinrichtingsdienst (1988) Indicatieve kwantificering van effecten van cultuur-technische ingrepen in de periode 1955-1985 op freatische grondwaterstanden in het zandgebied van de provincie Noord-Brabant. Landinrichtingsdienst 11.

Maas, C., P.K. Baggelaar, G. Van der Velde, M.H. Jalink en A.J.M. Jansen (1991) Waterwinning en verdroging. KIWA N.V.

Rolf, H.L.M. (1989) Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland: analyse periode 1950-1986. DGV-TNO.

Van Bakel, P.J.T. en P.A.J.W. De Wit (1995) Zijn de toegenomen landbouwopbrengsten een der oorzaken van de verdroging in Nederland?; in: *H2O*, vol 28, no 25, pag 771-773.

Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en J.G. Kroes (2008) Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP; in: *Vadose Zone J.*, vol 7, no 2, pag 640-653.

Van den Akker, C. (2013) Tussen Dupuit en De Glee: Het ontstaan van de Toegevoegde Stijghoogteverlaging; in: *Stromingen*, vol 19, no 2, pag 5-23.

Van der Wal, B.J. (2014) Ontwikkeling Brabants grondwatermodel tot kennissysteem; in: *H2O-online*, vol. pag.

Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk, D.G. Cirkel, I. Leunk en H.F.M. Aarts (2015) Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant. KWR Watercycle Research Institute 49.

