

Inleiding

In de laatste decennia zijn door ingrepen in de landbouwwaterhuishouding, de toegenomen gewasproductie en de vergroting van permanente onttrekkingen de grondwaterstanden in een groot deel van Nederland gedaald [Projectteam verdroging, 1989]. De daling van grondwaterstanden heeft mede geleid tot de verdroging van Nederland. Daarnaast heeft deze daling ook een verandering in de natuurlijke grondwateraanvulling tot gevolg. Grondwateraanvulling is de hoeveelheid water die



E. P. QUERNER
DLO-Staring Centrum



W. H. B. AARNINK
DLO-Staring Centrum
(thans Min. LNV,
directie Landbouw)

vanuit de onverzadigde zone aan de verzadigde zone wordt toegevoegd [CHO, 1986].

Over de oorzaken van de verdroging zijn de laatste jaren diverse meningen naar voren gebracht. Meestal betrof dit een uitspraak over het verdrogingseffect van een enkele ingreep, beschreven met behulp van een eenvoudig modelconcept. Het is moeilijk om de effecten van verschillende ingrepen op deze manier te vergelijken, gezien de verschillende berekeningsmethoden met de daarbij behorende aannamen en nauwkeurigheden.

Kwantificering van de effecten van de verschillende ingrepen is alleen goed mogelijk met een fysisch regionaal-hydrologisch model, dat de interactie tussen de belangrijkste hydrologische componenten op dynamische wijze beschrijft en rekening houdt met relevante verschillen tussen deelgebieden. Het gaat hierbij vooral om de interacties tussen de meteorologische omstandigheden, de gewasontwikkeling, de vochthuishouding van de onverzadigde zone en het grondwater en tussen grond- en oppervlaktewater.

In opdracht van het RIVM is geanalyseerd in hoeverre ingrepen in de waterhuishouding de grondwateraanvulling en grondwaterstanden over de laatste veertig jaar hebben veranderd [Querner *et al.*, 1994]. Het ging daarbij primair om de effecten van waterhuishoudkundige maatregelen, landbouwkundige ontwikkelingen en vergroting van de permanente

Samenvatting

Door ingrepen in de waterhuishouding is in een groot deel van Nederland de grondwaterstand gedaald. Dit heeft mede geleid tot verdroging en tot veranderingen in natuur en landschap. Om de effecten van de ingrepen in de waterhuishouding te kunnen kwantificeren is in drie gebieden met behulp van het model SIMGRO de verandering in de grondwateraanvulling en de grondwaterstanden berekend. Voor dit onderzoek is een aantal scenario's gedefinieerd en doorgekeurd. Alle scenario's hebben betrekking op ingrepen over de laatste veertig jaar. De resultaten geven een beeld van de verandering in de waterhuishouding van het ondiepe grondwater en zijn gepresenteerd per grondwatertrap (Gt). Het blijkt dat bij diepere grondwaterstanden de grondwateraanvulling toeneemt, door een afname van de capillaire nalevering. Uit de resultaten van de berekeningen blijkt verder dat de invloed van de meteorologische omstandigheden op de grondwateraanvulling groter is dan welke ingreep in de waterhuishouding ook. Van de ingrepen heeft de veranderde ont- en afwatering verreweg het meeste effect op de grondwaterstanden.

onttrekkingen. In dit artikel worden enige resultaten uit die studie gepresenteerd. Allereerst is een beschrijving over de methode opgenomen. Daarna worden resultaten van de natuurlijke grondwateraanvulling gepresenteerd voor de huidige situatie en tot slot de effecten van ingrepen op de grondwateraanvulling en grondwaterstanden.

Methode van onderzoek

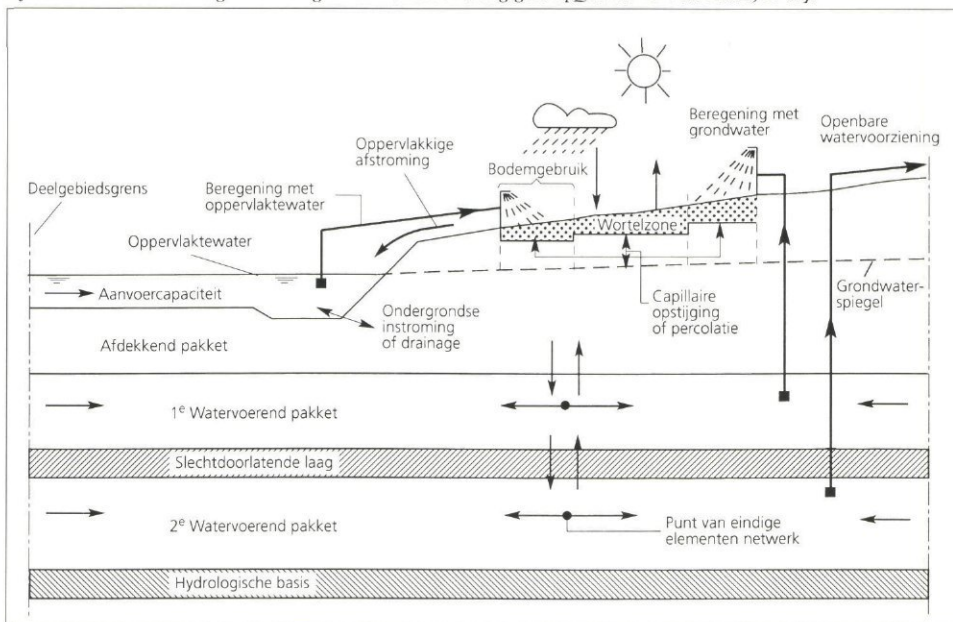
Voor het berekenen van de effecten van de verschillende ingrepen is gebruik gemaakt van het regionaal-hydrologisch model SIMGRO [Querner & Van Bakel, 1989]. Gekozen is voor het niet-stationaire model SIMGRO, omdat het een regionaal model is en de processen in de onverzadigde zone, de verzadigde zone en het oppervlaktewater geïntegreerd beschrijft (afb. 1). Voor de berekening van de grondwaterbeweging in de verzadigde zone wordt het modelgebied opgedeeld in een aantal

eindige elementen met knooppunten. De berekening van de onverzadigde grondwaterstroming vindt plaats per bodemgebruiksvorm en per deelgebied. Elk deelgebied, waarvan de waterhuishouding is weergegeven in afbeelding 1, is een deelverzameling van knooppunten uit het eindige-elementennetwerk. Het oppervlaktewater binnen een deelgebied wordt beschouwd als één reservoir.

In de studie zijn drie voorbeeldgebieden gekozen waarvan een gekalibreerd SIMGRO-model aanwezig was, te weten het Kromme-Rijngedebied in de provincie Utrecht [provincie Utrecht, 1994], Westerwolde in de provincie Groningen [Landinrichtingsdienst, 1991] en het gebied van de Poelsbeek en Bolscherbeek in Twente [Querner, 1993].

Om de effecten van ingrepen te kunnen kwantificeren is een scenariostudie opgezet. Per ingreep is een aantal scenario's gedefinieerd op basis van veranderingen over de

Afb. 1. - Waterhuishouding in een deelgebied schematisch weergegeven [Querner & Van Bakel, 1989].



afgelopen veertig jaar. Als referentie voor de berekeningen is de waterhuishoudkundige situatie van de jaren tachtig gekozen, omdat de drie modeltoepassingen voor die situatie zijn gekalibreerd. Via de ingrepen wordt dan teruggerekend naar de situatie van de jaren vijftig. Deze (omgekeerde) ingrepen zijn dus ook de ingrepen waarmee de verdroging effectief kan worden verminderd. Voor het berekenen van de referentiesituatie zijn vijf min of meer gemiddelde weerjaren gekozen. De meteorologische omstandigheden zijn geüniformeerd, om de resultaten voor de drie gebieden ook onderling te kunnen vergelijken (weersgegevens De Bilt). Hiervoor zijn achtereenvolgens de jaren '64, '69, '73, '77 en '85 genomen. De gemiddelde neerslag bedroeg $774 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ en de gewas-referentie-verdamping gemiddeld $541 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$. Voor elk scenario is de gemiddelde verandering in GLG, GHG en grondwateraanvulling berekend voor alle deelgebieden met dezelfde grondwatertrap in de drie voorbeeldgebieden. De resultaten zijn gepresenteerd per grondwatertrap, omdat deelgebieden met ondiepe grondwaterstanden anders reageren dan deelgebieden met diepere grondwaterstanden. Daarnaast zijn alle termen van de waterbalans van het topsysteem berekend [Querner *et al.*, 1994].

Grondwateraanvulling huidige situatie

Voor de belangrijkste bodemgebruiksvormen aanwezig in de voorbeeldgebieden, is de verandering in natuurlijke grondwateraanvulling berekend. De grondwateraanvulling is het water dat vanuit de onverzadigde zone naar het verzadigde grondwater stroomt. Gedurende het jaar verandert de grondwateraanvulling en in de zomerperiode kan deze negatief worden door het optreden van een capillaire flux. Over langere perioden (enkele jaren) is de natuurlijke grondwateraanvulling gelijk aan de neerslag min de actuele evapotranspiratie. Daarbij wordt de verandering van vocht in de onverzadigde zone verwaarloosd. Voor de berekeningsperiode van 5 jaar is in tabel I de grondwateraanvulling voor de belangrijkste bodemgebruiksvormen als gemiddelde per jaar weergegeven. Voor deelgebieden met Gt IV en VII zijn

voldoende resultaten uit de drie voorbeeldgebieden aanwezig. Voor de overige Gt-klassen is het aantal resultaten (voor één of meer voorbeeldgebieden) vaak beperkt. De resultaten zijn gepresenteerd als een gemiddelde van de drie voorbeeldgebieden, omdat de verschillen tussen de drie gebieden niet erg groot zijn. De nodige voorzichtigheid is echter geboden in verband met het geringe aantal deelgebieden waarop sommige resultaten in tabel I zijn gebaseerd. Daarnaast is als orde van grootte, de spreiding in resultaten weergegeven binnen elk voorbeeldgebied. De getallen in tabel I laten zien dat voor alle bodemgebruiksvormen de grondwateraanvulling toeneemt als de grondwaterstand dieper wordt. Voor Gt III tot en met VII verloopt deze toename vrij geleidelijk. Zo neemt op grasland de grondwateraanvulling toe van $238 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ voor Gt III tot $282 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ voor Gt VII. Van Gt VII naar Gt VIII is de stap aanmerkelijk groter. In deelgebieden met Gt III is de actuele verdamping nagenoeg gelijk aan de potentiële verdamping en daardoor is de aanvulling minder dan bij de diepere grondwaterstanden. Bij deze diepere grondwaterstanden is in het algemeen de actuele verdamping lager dan de potentiële (door vochttekort in de wortelzone) en is de grondwateraanvulling groter. Ook het geringere vochtbergend vermogen van de wortelzone bij diepere grondwaterstanden speelt hierbij een rol. Bij ondiepere grondwaterstanden is tijdens drogere perioden nog sprake van capillaire opstijging, waardoor water voor de verdamping beschikbaar blijft. De grondwateraanvulling is hierdoor minder.

Verandering grondwateraanvulling en grondwaterstanden door ingrepen

In dit onderzoek is gepoogd de effecten van de belangrijkste veranderingen en ingrepen in de waterhuishouding te kwantificeren. De ingrepen en veranderingen die over de laatste veertig jaar hebben plaatsgevonden, zijn in belangrijke mate toe te schrijven aan:

- toename van de permanente onttrekkingen van grondwater;
- veranderingen in de verdamping door toegenomen productie;

- toename van de berekening;
- wijzigingen in bodemgebruik;
- verstedelijking;
- veranderingen in de ontwatering, afwatering en wateraanvoer;
- veranderingen in weersgesteldheid.

Er zijn scenario's gedefinieerd waarin bovenstaande ingrepen afzonderlijk zijn doorgerekend. Deze scenario's zijn gebaseerd op landelijke trends in deze ingrepen tussen de jaren vijftig en de jaren tachtig. Per gebied kunnen ingrepen, zoals de ontwatering of onttrekkingen, echter sterk verschillen. Bij de definitie van de scenario's is daarom een beperkt aantal vaste veranderingen (ingrepen) gekozen. Per ingreep ging het telkens om vier scenario's [Querner *et al.*, 1994]. Dit betekent dat er voor de voorbeeldgebieden scenario's zijn doorgerekend met (extreme) ingrepen die in die gebieden zelf niet hoeven te zijn opgetreden. Van een aantal scenario's worden in tabel II de uitgangspunten en resultaten weergegeven. In elk scenario is telkens één verandering doorgevoerd. Dus bij het scenario 'ont- en afwatering' is alleen die verandering doorgevoerd in het model. Alle scenario's zijn doorgerekend met vijf min of meer gemiddelde weerjaren, behalve de scenario's M2 t/m M4. Die zijn met de meteorologische gegevens van die perioden doorgerekend. Van een aantal van de doorgerekende scenario's zijn de resultaten gepresenteerd in tabel II. In deze tabel is het effect van de ingrepen alleen gepresenteerd voor deelgebieden met grondwatertrappen IV en VII. Het effect van een scenario is weergegeven als de verandering van de grondwateraanvulling en de verandering van de GLG en GHG. Deze verandering van de grondwaterstand of grondwateraanvulling is berekend door het resultaat van een scenario te vergelijken met die voor de referentiesituatie. Berekening is niet in tabel II opgenomen. Het effect van berekening is afhankelijk van de berekeningsgift en/of het water onttrokken wordt uit oppervlaktewater dan wel uit grondwater. Hierdoor is dit effect moeilijk te vergelijken met de andere ingrepen. Ook de effecten van een veranderend bodemgebruik op zich zijn gering. Deze kan evenwel in combinatie met andere ingrepen aanzienlijk zijn. Als bijvoorbeeld landbouwgrond wordt omgezet in stedelijk gebied, dan kunnen door bijkomende veranderingen in de ont- en afwatering aanzienlijke verlagingen optreden in grondwaterstanden. Voor het effect op de grondwateraanvulling kan het volgende uit tabel II geconcludeerd worden:

- de invloed van de meteorologische

TABEL I – De gemiddelde grondwateraanvulling ($\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$) in de drie voorbeeldgebieden voor vier bodemgebruiksvormen en per Gt-klasse (cursieve getallen zijn waarden berekend voor slechts één modelgebied en onderstreepte getallen zijn gemiddelden van twee gebieden).

Gt	Gras	Akkerbouw	Naalddhout	Loofhout	Spreiding (+/-)
III	238	219	145	265	20
IV	248	238	145	267	15
V	254	234	–	–	*
VI	256	248	150	270	15
VII	282	270	158	279	30
VIII	336	338	217	333	50

* Niet voldoende gegevens bekend

TABEL II – De belangrijkste effecten van ingrepen op de grondwateraanvulling en grondwaterstanden voor Gt IV en VII in de drie voorbeeldgebieden. (De cursieve getallen betreffen het referentiescenario; de overige zijn gegeven als afwijkingen ten opzichte van dit referentiescenario. Een negatief getal voor grondwateraanvulling is een afname en een negatief getal bij grondwaterstanden is een verondieping).

Omschrijving	Grondwateraanvulling		Grondwaterstanden (m)			
	Min. (mm·j ⁻¹)	Max. (mm·j ⁻¹)	GLG		GHG	
			Min.	Max.	Min.	Max.
Referentiesituatie (1990)*	211	288	1,06	1,64	0,55	1,13
Stopzetting permanente ontr.	-10	0	-0,09	0,00	-0,08	0,00
Afname gewasverdamping	24	66	-0,07	-0,02	-0,03	-0,02
Verondieping waterl. (0,30 m)**	-37	-5	-0,25	-0,15	-0,39	-0,23
Stopzetting wateraanvoer	3	5	0,04	0,16	0,01	0,04
Weerjaren '50	4	14	-0,01	0,03	-0,07	0,00
Weerjaren '60	94	119	-0,09	-0,04	-0,14	-0,06
Weerjaren '70	-31	-16	0,02	0,07	-0,03	0,00
Weerjaren '80	10	30	-0,01	0,04	-0,08	-0,04

* Gemiddelde weersomstandigheden.

** Afwatering ook aangepast.

omstandigheden op de grondwateraanvulling is groter dan welke ingreep in de waterhuishouding ook (variatie -31 tot 119 mm·j⁻¹);

– in de jaren vijftig was de productie van landbouwkundige gewassen lager dan tegenwoordig. Door deze geringere productie was de potentiële verdamping ook lager. In tabel II is te zien dat dit een hogere grondwateraanvulling van 24 tot 66 mm·j⁻¹ tot gevolg had [zie ook Van Bakel en De Wit, 1995];

– het blijkt dat de grondwateraanvulling, behalve door de veranderde gewasverdamping, vooral is beïnvloed door de ont- en afwatering (tot 37 mm·j⁻¹): bij diepere grondwaterstanden is de grondwateraanvulling groter omdat de capillaire opstijging wegvalt. Dit effect blijkt ook uit tabel I;

– veranderende wateraanvoer of het stopzetten van onttrekkingen hebben nauwelijks invloed op de grondwateraanvulling. Dit geldt vooral op de regionale schaal, maar lokaal, dichtbij een onttrekking waar grote veranderingen in grondwaterstanden optreden, zal het effect groter zijn.

Voor het effect op de grondwaterstanden (GLG en GHG) blijkt uit tabel II het volgende:

– het scenario waarbij de ont- en afwatering is veranderd, heeft verreweg het meeste effect op de grondwaterstanden (0,15-0,39 m);

– de verschillende weersomstandigheden van de laatste veertig jaar hebben invloed gehad op de grondwaterstanden. Vooral het verschil tussen de natte jaren zestig en de drogere jaren zeventig heeft tot verschillen geleid in de orde van 0,06 tot 0,11 m;

– de grondwaterstanden (GLG en GHG) worden in mindere mate beïnvloed door het stopzetten van wateraanvoer (0,01-0,16 m), veranderde gewasverdamping (tot 0,07 m) en stopzetten van onttrekkingen (tot 0,09 m op regionale schaal). De beïnvloeding door onttrekkingen is

lokaal, dichtbij de onttrekkingen, veel groter dan in tabel II staat aangegeven.

Conclusies

De grondwateraanvulling neemt toe als de grondwaterstanden dieper worden. Bij Gt III tot en met VII is deze toename min of meer constant. Bij Gt VIII is deze waarde veel hoger, veroorzaakt door een sterker afgenomen verdamping. De invloed van de weersgesteldheid op de grondwateraanvulling is gedurende de laatste veertig jaar groot geweest. Zo was in de jaren zestig de grondwateraanvulling aanmerkelijk groter dan in de jaren ervoor of erna. De veranderingen in grondwateraanvulling leiden ook tot verschillen in grondwaterstanden. Vooral weersveranderingen tussen de jaren zestig en zeventig hebben tot grote verschillen geleid.

Door de stijging in productie van landbouwkundige gewassen gedurende de laatste veertig jaar is de gewasverdamping toegenomen. Dit heeft tot gevolg dat daardoor de grondwateraanvulling sinds de jaren vijftig is afgenomen. Dit effect is echter minder groot dan de effecten van verschillen in weersgesteldheid over de laatste veertig jaar.

Van de ingrepen heeft de veranderde ont- en afwatering verreweg het meeste effect op de grondwaterstanden. De grondwaterstanden worden in mindere mate beïnvloed door het stopzetten van wateraanvoer, veranderde gewasverdamping en stopzetten van onttrekkingen.

Onttrekkingen hebben vooral lokaal voor aanzienlijke veranderingen in grondwaterstanden geleid, een aspect dat niet in deze studie is meegenomen.

Tot slot

Geanalyseerd is in hoeverre ingrepen in de waterhuishouding de grondwateraanvulling en grondwaterstanden hebben veranderd. Het ging daarbij primair om de effecten

van waterhuishoudkundige maatregelen, landbouwkundige ontwikkelingen en vergroting van de onttrekkingen voor drinkwater. De resultaten uit dit onderzoek kunnen worden gebruikt om de gevolgen van veranderend beleid aan te geven. Plannen voor anti-verdrogingsmaatregelen voor de waterhuishouding, ontwikkelingen in de landbouw en de drinkwateronttrekkingen kunnen met de resultaten uit dit onderzoek op hun merites worden getoetst of afgewogen. De resultaten (ingreep-effectrelaties) zijn bruikbaar voor de planvorming, maar voldoen niet bij het onderbouwen van daadwerkelijke wijzigingen in de praktijk. Hiervoor zijn de huidige berekeningen te globaal. In dat geval zullen specifieke eisen en omstandigheden per gebied een invloed hebben op de effecten, die daardoor zullen afwijken van de tijdens dit onderzoek gevonden relaties.

Literatuur

- Bakel, P. J. T. van, & Wit, P. A. J. W. de (1995). *Zijn de toegenomen landbouwopbrengsten een der oorzaken van de verdroging in Nederland?* H₂O 28(25): 770-773.
- CHO (1986). *Verklarende hydrologische woordenlijst. Den Haag*, CHO TNO. Rapporten en Nota's 16.
- Landinrichtingsdienst (1991). *Hydrologisch modelonderzoek Westerwolde. Groningen*, Landinrichtingsdienst Groningen, Afd. Onderzoek (niet gepubliceerd).
- Provincie Utrecht (1994). *Hydrologisch onderzoek Kromme Rijn*. Deelrapport II, SIMGRO. Provincie Utrecht, Dienst Water en Milieu. Rapport 6b.
- Projectteam Verdroging (1989). *Verdroging van natuur en landschap*. Het technisch rapport. Uitgevoerd door Instituut voor Milieuvraagstukken, Centrum voor Milieukunde, Dienst Grondwaterverkenning TNO, Rijks Instituut voor Natuurbeheer. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Querner, E. P. (1993). *Aquatic weed control within an integrated water management framework*. Dissertatie, Landbouwniversiteit Wageningen. DLO-Staring Centrum, Wageningen. Report 67.
- Querner, E. P. & Bakel, P. J. T. van (1989). *Description of the regional groundwater flow model SIMGRO*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Report 7.
- Querner, E. P., Aarnink, W. H. B. en Mourik, C. C. P. van (1994). *Scenariostudie naar de verandering van grondwateraanvulling en grondwaterstanden tussen de jaren vijftig en tachtig; ingrepen in de waterhuishouding doorgerekend in drie voorbeeldgebieden met het model SIMGRO*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 308.

