
De verandering van de GXG door grondwateronttrekkingen in vrij afwaterende gebieden

C. van den Akker¹

Voor de bepaling van landbouwschade als gevolg van grondwateronttrekkingen is informatie over de verandering van de GHG en GLG (GXG) noodzakelijk. In vrij afwaterende gebieden met een dun freatisch pakket boven een weerstand-biedende laag en een daaronder gelegen dik watervoerend pakket kan een relatie worden gevonden tussen de gebiedsgemiddelde grondwaterstand en de afvoer per oppervlakte eenheid. Deze relaties vertonen een sterk niet-lineair verloop door het feit dat de slootdichtheid tamelijk sterk afneemt als het freatisch vlak wordt verlaagd. Voor het geval deze relaties een logaritmisch verloop hebben kan met behulp van een hyperbolische overdrachtsfactor de verandering van de GXG worden berekend indien een onttrekking uit het diepe pakket plaatsvindt. Tevens wordt met het resultaat een substantieel deel van de zogenoemde achtergrondverlaging verklaard.

De relatie tussen grondwaterstand en afvoer is voor het zandgebied in het zuidoosten van Nederland op basis van metingen vastgesteld (Ernst, 1971). Aan de hand van een fictieve grondwateronttrekking in die regio wordt de verandering in de GXG als voorbeeldberekening gepresenteerd en worden de resultaten vergeleken met de uitkomsten verkregen met een dynamische berekening en eerdere berekeningen.

Inleiding

In (Van den Akker, 2014) is de relatie tussen de gebiedsgemiddelde grondwaterstand en de afvoer per eenheidsoppervlak afgeleid. Deze relatie geldt voor vrij afwaterende gebieden op een regionale schaal, waarbij het freatisch pakket een laag doorlaatvermogen en het diepe pakket een hoog doorlaatvermogen heeft. De scheidende laag heeft een hydraulische weerstand die niet meer is dan enkele duizenden dagen. Deze relatie is (zie afbeelding 1):

$$U = \frac{a}{c} \ln(-h + m_v + b) + C_1 \quad (1)$$

¹ Prof.dr.ir. C. van den Akker (cvandenakker@casema.nl)

waarin:

U = afvoer per eenheidsoppervlak [mm/dag]

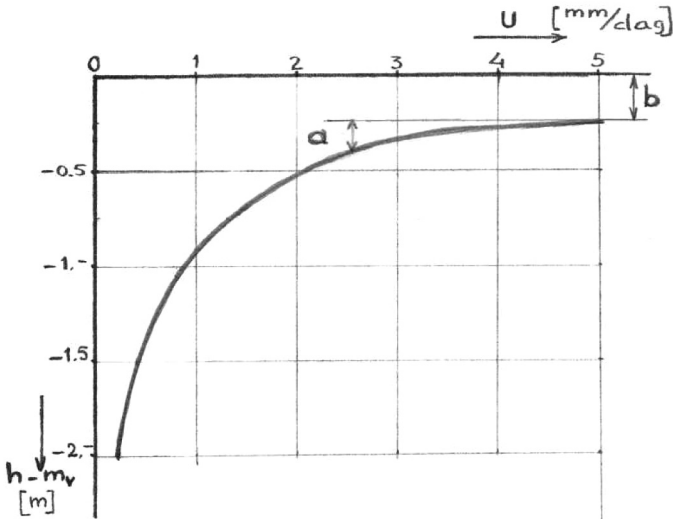
a = constante < 0 [m]

b = constante ≤ 0 [m]

m_v = maaiveldhoogte ten opzichte van referentie niveau [m]

h = freatische grondwaterstand [m]

c = hydraulische weerstand van de scheidende laag [dagen]



Afbeelding 1: Relatie tussen afvoer per eenheidsoppervlak en de grondwaterstand.

Deze logaritmische relatie heeft daarmee drie vrijheidsgraden te weten a , b , en c .

Uit vergelijking 1 volgt:

$$\frac{dU}{dh} = \frac{a}{c} \left(\frac{1}{h - m_v - b} \right) \quad (2)$$

Indien een onttrekking door middel van een volkomen put plaatsvindt in het diepe watervoerende pakket zal de volumestroomdichtheid door de weerstand biedende laag veranderen. Indien we aannemen dat de onttrokken volumestroom gelijk is aan de vermindering van de oppervlaktewater afvoer geldt:

$$\frac{dq}{dh} = \frac{dU}{dh} \quad (3)$$

Aangezien geldt dat:

$$\frac{dq}{dh} = \frac{d}{dh} \left(-\frac{h - \varphi}{c} \right) = -\frac{1}{c} \left(1 - \frac{d\varphi}{dh} \right) \quad (4)$$

volgt hieruit dat:

$$\frac{dh}{d\varphi} = \frac{1}{\left(1 + \frac{a}{h - m_v - b} \right)} \quad (5)$$

In (Van den Akker, 2013) is de overdrachtsfactor F gedefinieerd als:

$$\frac{dh}{d\varphi} = F \quad \text{waarbij} \quad 0 < F \leq 1$$

Uit vergelijking 5 volgt tevens dat:

$$\varphi = h - m_v - b + a \ln(-h + m_v + b) + C1 \quad (6)$$

De differentiaalvergelijking voor de stroming naar een volkomen put wordt daarmee (Van den Akker, 2013):

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} - \left\{ \frac{\varphi - m_v - b - a W \left\{ -\frac{1}{a} \exp \left(\frac{\varphi - C1}{a} \right) \right\}}{\lambda^2} \right\} = 0 \quad (7)$$

waarin:

r = poolcoördinaat [m]

φ = grondwaterstijghoogte ten opzichte van referentie niveau [m]

λ = spreidingslengte [m]

W = Lambert W functie

en waarbij geldt dat als in de uitgangssituatie:

$$h_0 = \phi_0, \quad \text{dan is} \quad C1 = m_v + b - a \ln(-h_0 + m_v + b)$$

De randvoorwaarden zijn (Van den Akker, 2013):

$$\text{voor } r = r_w \quad \text{geldt dat} \quad q_r 2\pi H r_w = Q_0$$

$$\text{en voor } r = R_s \quad \text{geldt dat} \quad \frac{d\varphi}{dr} = 0$$

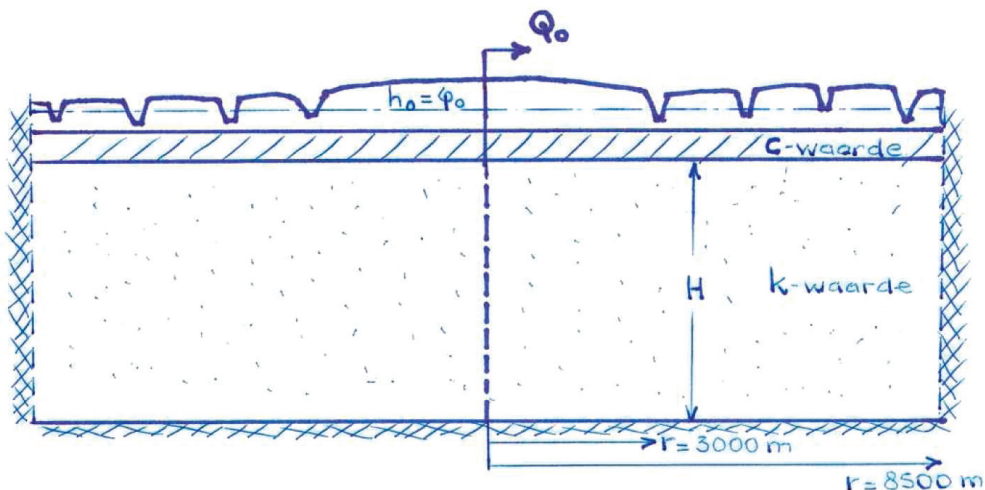
Met behulp van MATLAB wordt vergelijking 7 eenvoudig opgelost.

Toepassing van de rekenmethode

Laten we een grondwaterwinning beschouwen die in meer of mindere mate representatief is voor situaties zoals die in het zuidoosten van Nederland voorkomen en waarbij deze winning één is in een stramen van winningen die op een afstand van 17 km van elkaar zijn gelegen. De grootte van de onttrekkingen is gelijk. Rondom de winningslocatie is een cirkelvormig gebied zonder oppervlaktewater. De straal van dit gebied is 3000 m. Daarbuiten is een vrij afwaterend landbouwgebied. De onttrekking vindt plaats uit een pakket met een doorlaatvermogen van 5000 m²/dag. Op dit pakket ligt een weerstand biedende laag met een hydraulische weerstand en daarboven een dun freatisch pakket met een laag doorlaatvermogen. In afbeelding 2 is de situatie geschematiseerd weergegeven. Op basis van symmetrie is op een afstand van 8500 m een randvoorwaarde aanwezig waarvoor geldt dat de verandering van de stroming in het watervoerende pakket door de onttrekkingen nihil is. Voordat de winning een aanvang nam waren de volgende grondwatertrappen aanwezig, vastgesteld op basis van de

COLN kartering uit 1950. In het landbouwgebied waren grondwatertrappen GT V en GT VI aanwezig. De bijbehorende GHG wordt ingeschat op 0,60 m en de GLG op 1,60 m. In het rekenschema is uiteraard uitgegaan van het gegeven dat in de uitgangssituatie de stijghoogte en de grondwaterstand gelijk zijn. Dit is een belangrijk gegeven, het bepaalt mede de waarde van C_1 in de vergelijking 7.

Op zeker moment is de winning gestart waarbij in een periode van tientallen jaren de capaciteit werd opgevoerd tot de huidige constante onttrekkingshoeveelheid van 7,3 miljoen kubieke meter per jaar (20.000 m³/dag).



Afbeelding 2: Geohydrologische schematisering.

De vraag is nu: "Hoeveel bedraagt de verlaging van de GXG als functie van de afstand tot de winningslocatie, waarbij wordt uitgegaan van de relatie die is gepubliceerd in (Ernst, 1971) voor deze regio en die het verband geeft tussen de gebiedsgemiddelde grondwaterstand en de oppervlaktewater afvoer per eenheidsoppervlak?". Deze publicatie is uit een periode waarin volop ruilverkavelingen werden gepland en ook reeds waren uitgevoerd. Ik heb niet kunnen achterhalen of eventuele effecten van de ruilverkavelingen die in de jaren voor 1971 hebben plaatsgevonden zijn meegenomen in de relatie. Vooralsnog ga ik er vanuit dat de relatie die Ernst publiceerde geldig is en gebruikt kan worden om de huidige verlagingen van de GXG te bepalen.

De waarden van a en b worden uit de gemeten relatie bepaald (Van den Akker, 2014). Dit levert als resultaat:

$$a = -0,15m \quad \text{en} \quad b = -0,25m$$

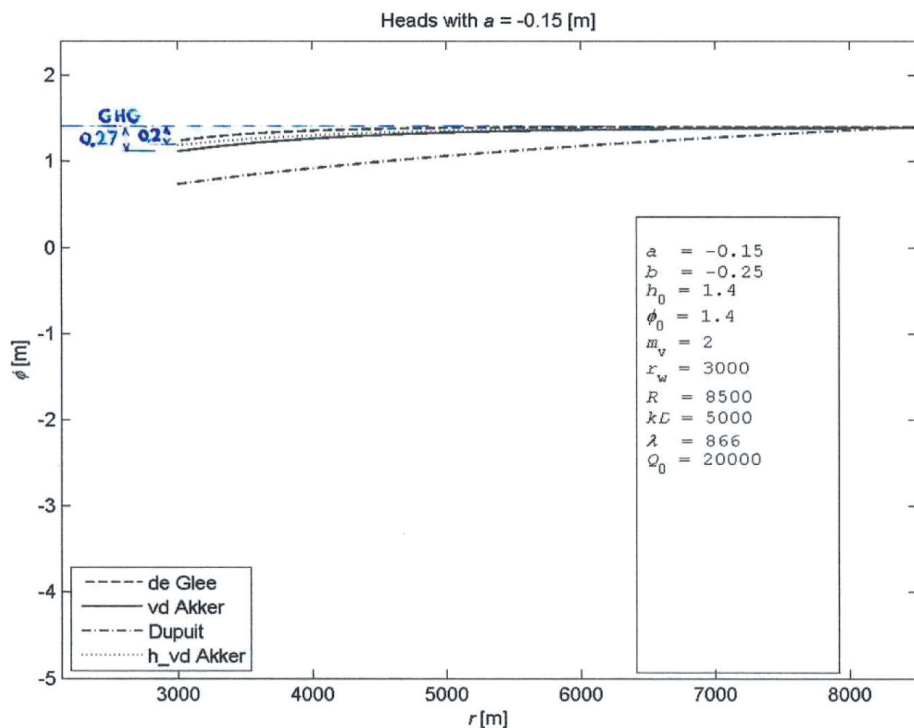
Zodra deze waarden bekend zijn kan met behulp van de gemeten relatie voor een bepaalde grondwaterstand, bijvoorbeeld in de buurt van 1 meter, de bijbehorende waarde van de afvoer U worden bepaald en daarmee de c -waarde van de weerstand biedende laag. In de betreffende relatie resulteert dit in een waarde voor de hydraulische weerstand van 147 dagen, afgerond 150 dagen.

Deze waarde voldoet aan de voorwaarde dat hij niet te hoog mag zijn in relatie met de geldende grondwatertrappen in het gebied. Immers bij grondwatertrappen V en VI mogen we verwachten dat de hydraulische weerstand niet hoog is.

Het cirkelvormige gebied met een straal van 0 tot 3000 m is een gebied waar geen voedingsverandering plaatsvindt als gevolg van de winning, er is immers geen oppervlaktewater aanwezig. Hierbij wordt dus een eventuele verdampingsreductie verwaarloosd. Op 3000 m is daarmee de totale volumestroom in het diepe watervoerende pakket als gevolg van de onttrekking gelijk aan de onttrekking van de winning. Het volstaat dus om als randvoorwaarde voor de oplossing van vergelijking 7 voor de straal van de put 3000 m te gebruiken. Het verloop van de grondwaterstand en stijghoogte binnen de afstand van 3000 m kan eenvoudig met de formule van Dupuit worden beschreven waarbij wordt aangesloten op de berekende verlaging met vergelijking 7 op de afstand 3000 m van de put.

Voor de vaststelling van eventuele landbouwschade door grondwateronttrekkingen is informatie nodig over de verandering van de GXG. Hierna worden voor de GHG en de GLG de veranderingen berekend als functie van de afstanden tot de onttrekking. Met name de verandering van de GLG is belangrijk bij de berekening van de verdampingsreductie en daarmee voor de vaststelling van de landbouwschade.

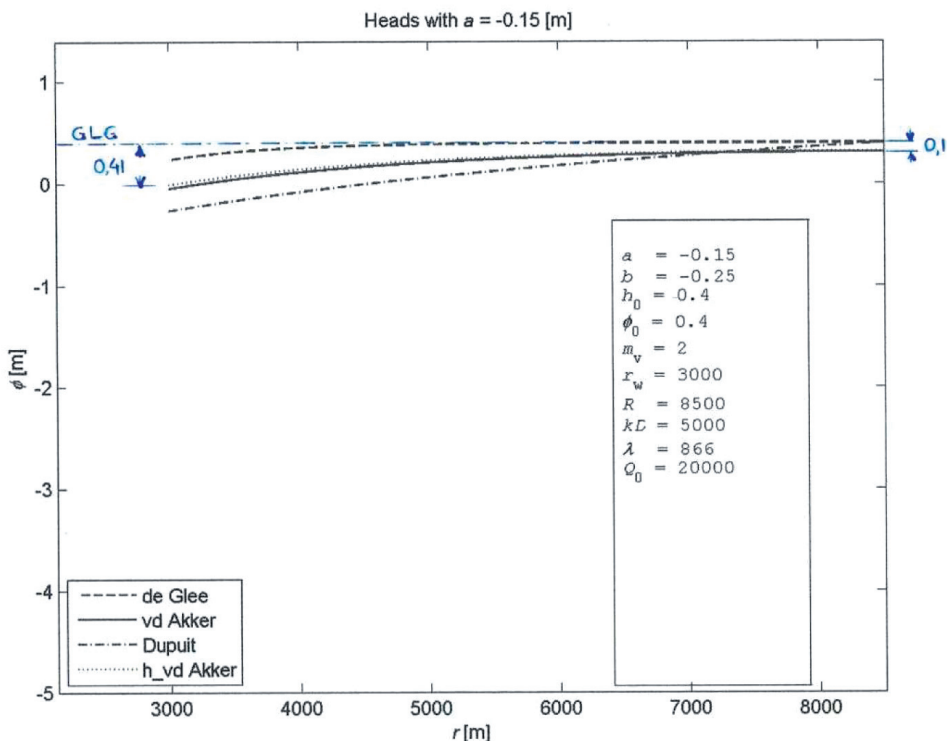
In afbeelding 3 is het resultaat weergegeven van de verlaging van de GHG van 3000 tot 8500 m. Op 3000 m wordt een verlaging van de GHG berekend van ongeveer 0,2 m



Afbeelding 3: Verlaging van de GHG.

en een verlaging van de stijghoogte van 0,27 m. In de afbeelding staan tevens de verlagingen aangegeven berekend met De Glee, dus met een verlaging van het freatisch vlak gelijk aan nul en de Dupuit verlaging met een Dirichlet randvoorwaarde op 8500 m. We zien dat op 5 tot 6 km de verlagingen met De Glee en vd Akker vrijwel nihil zijn. Zoals gesteld kan bij elke verlaginglijn van de stijghoogte op 3000 m de aansluiting worden getekend van de stijghoogte tot aan de put op basis van het logaritmische verloop uit de Dupuit formule.

In afbeelding 4 is het resultaat weergegeven van de verlaging van de GLG van 3000 m tot 8500 m. Op 3000 m wordt een verlaging berekend van de GLG van ongeveer 0,41 m en een verlaging van de stijghoogte die enkele centimeters meer is. Ook in deze afbeelding staan weer de verlagingen op basis van De Glee en Dupuit. We zien nu echter dat op 8500 m de verlaging van de GLG ongeveer 0,1 m is op basis van h_vd Akker. Op 4000 m is de verlaging van de stijghoogte op basis van vd Akker ongeveer 0,27 m en op 5000 m ongeveer 0,18 m. Opvallend is het zeer vlakke verloop van 5 km tot 8,5 km. Over een afstand van 3,5 km is de gradiënt minder dan 3 cm per kilometer.



Afbeelding 4: Verlaging van de GLG.

Uit de afbeeldingen 3 en 4 kunnen we concluderen dat de verlaging van de GLG groter is dan die van de GHG en dat de verlaging van de GLG veel verder doorloopt gemeten vanaf de onttrekking. Dit is uiteraard een bekend fenomeen, het voordeel van de voorgaande berekening is dat met een stationaire benadering een kwantificering mogelijk wordt. In (Van den Akker, 2013) is al aangetoond dat een hogere grondwaterstand als

uitgangssituatie leidt tot minder verlaging en een kleiner gebied van waaruit de voeding, die de onttrekking compenseert, afkomstig is.

De grondwaterstandsverlaging door de onttrekking in het gebied tussen 3 en 8,5 kilometer kunnen we uiteraard ook als gemiddelde waarde berekenen met de formule voor de TSV, dit is de toegevoegde stijghoogte verlaging, uit (Van den Akker, 2013).

Deze TSV is identiek aan de verandering van de grondwaterstand, maar is wel afhankelijk van de uitgangssituatie van deze grondwaterstand.

$$TSV = (gws + b) \left(\exp\left(\frac{c\Delta q}{a}\right) - 1 \right) \quad (8)$$

Hierin is Δq het quotiënt van de onttrokken hoeveelheid water als volumestroom en het oppervlak van het voedingsgebied tussen 3 en 8,5 kilometer. De oppervlakte van het voedingsgebied is 200 miljoen m² en dus is:

$$\Delta q = -0,1 * \frac{10^{-3}m}{dag}$$

Dit betekent dat de gemiddelde verlaging van de GHG bijna 0,04 m is en de gemiddelde verlaging van de GLG ongeveer 0,14 m is. De gemiddelde verlaging van de stijghoogte is uiteraard $c * \Delta q = 150 * 0,1 * 10^{-3} = 0,015 \text{ m}$ meer.

Vergelijking met de resultaten uit een dynamisch model

Ik heb voor de geohydrologische schematisering in het vorige hoofdstuk een bodemopbouw genomen die vergelijkbaar is met het axiaal-symmetrische model dat is gebruikt in de Olsthoorn (2014). Enkele getalsmatige invullingen verschillen, zo neemt Olsthoorn arbitrair een hydraulische weerstand van 100 dagen tegen mijn berekende 150 dagen en neemt hij voor het freatische pakket een doorlaatvermogen van 50 m²/dag waarbij ik stel dat deze zo laag is dat er een verwaarloosbare horizontale stroming in dit pakket is. Ook de onttrekking scheelt iets: 7,5 miljoen per jaar tegen mijn 7,3 miljoen kubieke meter per jaar. Verder heeft Olsthoorn in zijn model tal van gegevens nodig zoals neerslag, verdamping, bergingscoëfficiënten en, teneinde de drainageweerstand te bepalen, de geometrie en de afstand tussen de sloten. Olsthoorn maakt met zijn model twee runs van vijf jaar, één zonder en één met onttrekking en bepaalt daarmee de verlaging als functie van de tijd op verschillende afstanden van de constante onttrekking.

In mijn berekeningen ga ik, naast de vrijwel identieke geohydrologische schematisering en geometrie, enkel uit van de gegevens nodig om de overdrachtsfactor te bepalen, te weten de waarden a en b , die evenals de hydraulische weerstand c direct volgen uit de gemeten relatie in (Ernst, 1971).

Kwalitatief zitten er, gelukkig, overeenkomsten in de resultaten van beide berekeningen. Zo komt Olsthoorn eveneens tot de conclusie dat in de zomerperiode met lage grondwaterstanden op grote afstand, hij geeft de resultaten voor 7 km, nog een verlaging van de grondwaterstand van ongeveer 5 cm aanwezig is, in de winter met hoge grond-

waterstanden is die verlaging nihil. Ik bereken op 7 km in de zomer een verlaging van de grondwaterstand van ongeveer 12 cm dus ruim tweemaal zo veel en eveneens geen verlaging in de winter.

Op 3 km berekent Olsthoorn een GLG verlaging van ongeveer 0,3 m tegen mijn 0,41 m en voor de GHG een verlaging van 0,12 m tegen mijn 0,2 m.

Het lijkt er globaal op dat er een factor in de orde van grootte van anderhalf tot twee zit in de berekende verlagingen van de GHG en GLG, waarbij de verlagingen die Olsthoorn berekent, systematisch lager zijn. Het verschil kan zitten in de hydraulische weerstand: Olsthoorn 100 dagen en in mijn berekening 150 dagen. De spreidingslengte die Olsthoorn gebruikt in zijn berekening is daarmee 707 m tegen mijn 866 m. Daarentegen is de onttrekking die Olsthoorn gebruikt bijna 3% meer dan in mijn berekening.

Het grote verschil zit uiteraard in de bepaling van de drainageweerstand door Olsthoorn. Hij bepaalt op basis van schattingen een drainageweerstand van 132 dagen. Welke grondwaterstand hierbij hoort wordt niet aangegeven, maar ik meen te kunnen herleiden dat deze ongeveer 0,6 m is, dus overeenkomend met de grondwaterstand in de buurt van de GHG. In mijn berekeningen wordt het probleem van het moeten kennen van de drainageweerstanden opgelost door het feit dat de grondwaterstand/afvoerrelatie bekend is en via de overdrachtsfactor wordt meegenomen.

In (Van den Akker, 2014) heb ik aangegeven hoe de drainageweerstand als functie van de grondwaterstand en de drie vrijheidsgraden a , b en c kan worden berekend. Deze relatie is:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{a}{c} \left(\frac{1}{h - m_v - b} \right) \quad (9)$$

Dit betekent dat voor de waarden a , b en c uit mijn berekening voor de grondwaterstand van 0,6 m een drainageweerstand van $\gamma = 350$ dagen wordt verkregen dus 2,6 keer zo groot als Olsthoorn gebruikt.

Ik kan niet reconstrueren hoe in de berekening van Olsthoorn de aanpassing van de drainageweerstand aan een veranderende grondwaterstand wordt gedaan. Ik vermoed dat Olsthoorn voor een lineair verloop heeft gekozen hetgeen kan leiden tot een flinke onderschatting van berekende verlagingen. Het zou interessant zijn over deze informatie te beschikken zodat een vergelijking mogelijk wordt. Eveneens is het daarbij noodzakelijk te weten wat de grondwaterstanden zijn die in de twee runs worden berekend. Nu is alleen het verschil gepresenteerd, echter voor de correcte berekening van de drainageweerstand is de grondwaterstand als gegeven noodzakelijk.

Ter illustratie: In mijn berekening wordt op 3 km in de wintersituatie met een uitgangssituatie voor de GHG van 0,6 m een verlaging van 0,2 m berekend. De GHG komt daarbij op 0,8 m. Indien men de drainageweerstand ter plaatse berekent zou deze daarmee toenemen van 350 tot 550 dagen. Voor de GLG wordt uiteraard de drainageweerstand nog hoger. Zonder onttrekking is de drainageweerstand voor de GLG 1350 dagen en met onttrekking op een afstand van 3 km ongeveer 1760 dagen.

Resumerend stel ik dat zonder de benodigde informatie over de berekening van de drainageweerstand en de grondwaterstanden en stijghoogten met en zonder onttrekking een dynamische modellering niet verifieerbaar is en een vergelijking met een stationaire berekening niet goed mogelijk is.

Wel merk ik op dat ik vooralsnog meer vertrouwen heb in de gemeten relatie die Ernst presenteert, dan in de schattingen van Olsthoorn voor de berekening van de drainageweerstand.

Tenzij kan worden aangetoond dat de door Ernst gepubliceerde gemeten relatie niet correct is en dus de waarden voor a , b en c onjuist zijn kunnen we de berekende verlagingen via de overdrachtsfactor en de daaruit afgeleide formule voor de stroming naar een volkomen put, onder de gestelde geohydrologische condities, beschouwen als een goede weergave van wat in het radiaal-symmetrische model plaatsvindt ten aanzien van de verlagingen van de GXC.

Kritische kanttekening

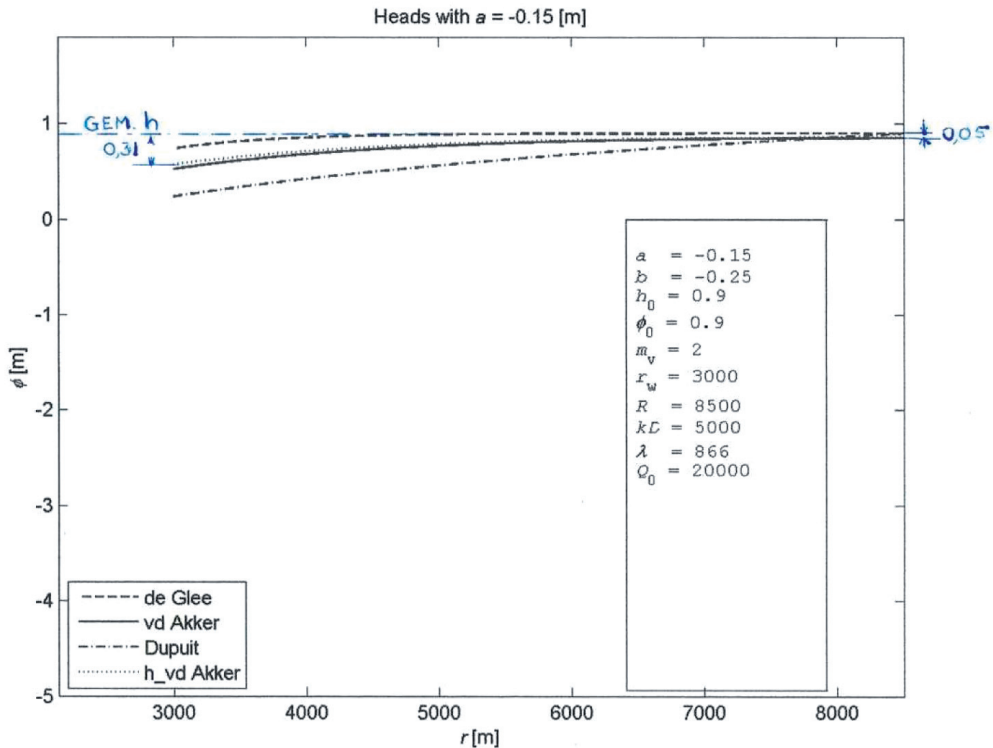
Het is zeker nog niet duidelijk wat het effect is van het lineair maken van een relatie tussen grond- en oppervlaktewater die in feite logaritmisch is. Ik heb uiteraard geen volledig overzicht over de relaties die in diverse grondwatermodellen zijn opgenomen. Echter de opmerking van Olsthoorn, nadat hij een rondvraag heeft gedaan ten behoeve van de NHV middag over het onderwerp achtergrondverlaging, dat de relatie er in zit is onvoldoende. Hij had misschien beter kunnen vragen bij de diverse modellenbouwers: Hoe is de relatie opgenomen? Ik vrees dat een systematische fout wordt gemaakt in de relatie tussen grond- en oppervlaktewater hetgeen leidt tot een onderschatting van verlagingen door grondwateronttrekkingen. De op deze wijze "gemiste" verlaging zou zeer wel eens mede de oorzaak kunnen zijn van de zogenoemde achtergrondverlaging.

Men zou het ook als volgt kunnen stellen: Als de modellen, waarvan men stelt dat "alle" relaties er inzitten, dan werkelijk zo goed zijn, waarom weten we dan nog steeds, aan de hand van die modellen, niet de oorzaak van de zogenoemde achtergrondverlaging?

Vergelijking met eerdere berekeningen

In Olsthoorn (2014) wordt een aantal malen gerefereerd aan eerdere berekeningen waarbij een gemiddeld verlagingenbeeld is vastgesteld (Maas, 2012). In deze berekeningen wordt een invloedstraal van ongeveer 4100 m vastgesteld. Daarbuiten is er geen invloed van de winning op de grondwaterstijghoogte.

Het is wellicht verhelderend dat ook ik de gemiddelde verlaging bereken zodat een vergelijking tussen resultaten mogelijk wordt. Ik doe dat door uit te gaan van een uitgangssituatie die ligt tussen de GHG en de GLG dus een grondwaterstand van 1,10 m minus maaiveld. De berekende verlagingen zijn weergegeven in afbeelding 5.



Afbeelding 5: Verlaging in de gemiddelde situatie.

De verlaging van de stijghoogte is op een afstand van 3000 m, dus op de rand van het landbouwgebied, ongeveer 0,36 m en de verlaging van de grondwaterstand 0,31 m. Olsthoorn berekent op die afstand gemiddelde verlagingen van ongeveer 0,23 respectievelijk 0,19 m. Op een afstand van 4,5 km berekent Olsthoorn voor de verlaging van de gemiddelde stijghoogte een waarde van bijna 0,1 m en ik op een afstand van 4,1 km een verlaging van de gemiddelde stijghoogte van 0,2 m. Op een afstand van 8500 m bereken ik een verlaging van de stijghoogte van ongeveer 0,05 m. Olsthoorn komt voor die afstand op een verlaging van de stijghoogte van ongeveer 0,02 m.

Nu zijn de berekeningen, gezien de verschillen in locatie, schematisering, onttrekkingshoeveelheden en gebruikte bodemparameters niet helemaal vergelijkbaar, maar ik ben van mening dat wel enkele conclusies kunnen worden getrokken.

Conclusies

- Zowel uit de berekening van Olsthoorn als die van mij volgt dat de verlaging van de gemiddelde grondwaterstand, evenals de GLG, veel verder doorloopt dan de vastgestelde invloedstraal van ruim 4 kilometer uit eerdere berekeningen.
- De zogenoemde achtergrondverlaging op een afstand van 4100 m zoals die is vastgesteld in eerdere berekeningen komt, op basis van de berekeningen van Olsthoorn en van mij, substantieel voor rekening van de onttrekking zelf.

- Het aandeel van de grondwaterwinning in de zogenoemde achtergrondverlaging neemt af met toenemende afstand tot de onttrekking. Voor de gemiddelde situatie in de hier gepresenteerde voorbeeldberekening komt de berekening Van den Akker op een stijghoogte verlaging van ongeveer 0,05 m op een afstand van 8500 m.

Aanbeveling

De methodieken voor de vaststelling van het verlagingenbeeld, dat dient als uitgangspunt voor de berekening van landbouwschade in vrij afwaterende gebieden, dienen te worden bijgesteld, zowel in de zin van de grootte van de verlagingen van de GXG als in de omvang van het gebied waar de verlagingen optreden. Zowel de verlagingen als de omvang van het gebied waar de verlagingen optreden blijken substantieel groter dan in het verleden werd aangenomen en waarop schadeberekeningen werden gebaseerd. Hierbij is onderzoek nodig naar de interactie tussen grond- en oppervlaktewater waarbij met name het niet-lineaire karakter aandacht verdient. Tevens dient de mening te worden herzien dat grondwateronttrekkingen niet bijdragen aan verlagingen die tot op heden als achtergrondverlaging werden gezien.

Referenties

Akker, C. van den (2013) Tussen Dupuit en De Glee; in: Stromingen JRG 19 nr 2

Akker, C. van den (2014) Een fysische onderbouwing van de overdrachtsfactor; in: Stromingen JRG 20 nr 1

Ernst, L.F. (1971) Analysis of groundwater flow to deep wells in areas with a non-linear function for the subsurface drainage; in: Journal of Hydrology 14

Maas, C. (2012) Het geval Terwisscha; in: Stromingen JRG 18 nr 2

Olsthoorn, T. (2014) De dynamica van de verlaging van Terwisscha of in vergelijkbare situaties; in: Stromingen JRG 20 nr 1

