
Tussen De Glee en Dupuit, revisited

Theo Olsthoorn¹

In voorliggend artikel wordt onderzocht in hoeverre de door Van den Akker (2013) geïntroduceerde kromme om de doorwerking te beschrijven van een stijghoogteverlaging door waterwinning op de grondwaterstand in een matig tot slecht doorlatende toplaag erboven een verklaring kan zijn voor de achtergrondverlaging die Maas (2012) bepaalde voor het gebied rond het Friese pompstation Terwisscha. Ook wordt nagegaan in hoeverre de door Van den Akker (2013) geïntroduceerde TSV (toegevoegde stijghoogte vergroting) nieuw is en wat deze precies inhoudt en in hoeverre de doorwerkcurve universeel mag worden geacht. Tenslotte wordt besproken in hoeverre de huidige hydrologische praktijk aanleiding kan zijn tot het onderschatten van verlagingen als gevolg van grondwateronttrekkingen.

De doorwerkcurve van Van den Akker (2013) wordt geacht te gelden voor vrij afwaterende gebieden, zoals die in de zandgebieden van het land vrij algemeen voorkomen. Door droogvallen van drainagemiddelen gedurende de zomer, werkt de verlaging van de stijghoogte door een waterwinning in zulke gebieden niet-lineair door op de grondwaterstand en de grootte van het invloedsgebied, waardoor lineair opschalen van verlagingen naar toekomstige winningen met en hoger debiet niet acceptabel is. De centrale vraag die Van den Akker (2013) opwerpt, is of deze doorwerking ten onrechte door hydrologen is verwaarloosd en het fenomeen van de achtergrondverlaging kan verklaren?

Uit de in dit artikel gepresenteerde analyse blijkt de TSV (Van den Akker, 2013) gelijk aan de grondwaterdaling die de onttrekking veroorzaakt en is daarmee geen nieuw fenomeen. Het blijkt ook dat de keuze voor een specifieke curve maatgevend is voor de mate waarin de grondwaterstand wordt beïnvloed door een verlaging van de stijghoogte. Met behulp van tijdreeksanalyse liet Maas (2012) zien dat de daling van het zogenoemde structureel niveau van de stijghoogte rond het pompstation Terwisscha in Friesland tussen de jaren zestig en negentig van de vorige eeuw tot op 4100 m een relatie heeft met de afstand van het pompstation; daarbuiten was deze daling constant, ca. 30 cm. Op grond daarvan werd geconcludeerd dat deze verlaging niet wordt veroorzaakt door de onttrekking en als achtergrondverlaging moet worden aangemerkt.

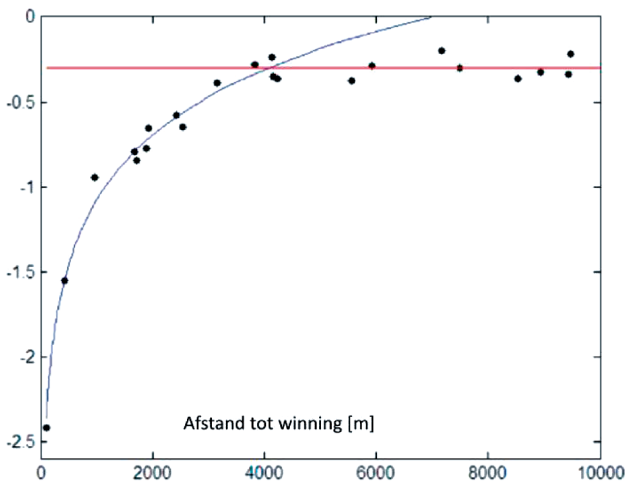
Toepassing van de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) op de situatie Terwisscha laat zien dat de verlaging op 8500 niet meer is dan ca. 2.5 cm. Dit impliceert dat de doorwerking volgens Van den Akker (2013) niet de achtergrondverlaging van meerdere decimeters kan verklaren die Maas (2012) vond.

¹ Prof. dr.ir. T.N.Olsthoorn, t.n.olsthoorn@tudelft.nl
N.a.v. voordracht NHV, Utrecht, donderdag 28 november 2013

Inleiding

Terwisscha is een mooi voorbeeld om de aanpak van verlagingberekeningen onder de loep te nemen, omdat het onderzoek dat sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw in Terwisscha is uitgevoerd, een weerspiegeling vormt van de methoden en technieken die in de hydrologie in de loop van een halve eeuw zijn ontwikkeld en toegepast. Maas (2012) geeft hiervan een uitgebreid en boeiend historisch overzicht, inclusief de resultaten van die onderzoeken.

Maas (2012) kwantificeert achtergrondverlaging voor Terwisscha door eerst met tijdreeksanalyse het structureel niveau te bepalen van de stijghoogte in het regionale watervoerende pakket over de zestiger jaren, toen nog zonder wezenlijke onttrekking en hetzelfde te doen over de negentiger jaren, toen de onttrekking van het pompstation nauwelijks constant 6.5 miljoen m³/a was. Dit structureel niveau is de stijghoogte die hoort bij een gekozen gemiddeld neerslagoverschot. Vervolgens trekt Maas de twee structurele niveaus van elkaar af, waarmee hij voor elke peilbuis een zuivere maat kreeg voor het meteo-gecorrigeerde verschil tussen beide periodes. Dit verschil bevat alles wat tussen die twee periodes is veranderd en invloed op de stijghoogte heeft, behalve het weer.



Afbeelding 1: Verlaging van de stijghoogte pompstation Terwisscha bepaald door Maas (2012) uit het verschil in structureel niveau in de jaren 60 en 90 van de vorige eeuw.

Dit verschil in structureel niveau is voor de afzonderlijke peilbuizen weergegeven in Afbeelding 1. De getrokken lijnen zijn een interpretatie van Maas (2012); de kromme lijn wordt recht wanneer de afstand op logaritmische schaal wordt uitgezet. Deze lijn suggereert dat er alleen tot circa 4100 m verband bestaat tussen verlaging en afstand. Ergo, redeneert Maas (2012), de verlaging door het pompstation Terwisscha reikt ook niet verder. Deze constante verlaging buiten 4100 m wordt vervolgens als achtergrondverlaging aangemerkt.

Een kromme lijn (recht op logschaal) krijg je ook in de situatie die Dupuit voor ogen had, waarbij de voeding in zijn geheel afkomstig is van een rand op vaste afstand R van de onttrekking, waarbij $R=4100$ m in Afbeelding 1.

Een situatie met voeding vanuit een uitgebreid stelsel van sloten lijkt meer op die welke De Glee voor ogen stond. Bij zo'n voeding hoort een geleidelijke overgang tussen beide lijnen van Afbeelding 1. Het ontbreken hiervan is mogelijk een artefact omdat deze radiale grafiek geen rekening houdt met de ruimtelijke verdeling van de peilbuizen en evenmin met verspreid voorkomen van potklei. Aan de ogenschijnlijk scherpe overgang mogen we dus geen waarde toekennen (Maas (2013, mondelinge mededeling).

Maas (2012) bepaalt de verlaging van de stijghoogte rond pompstation Terwisscha door van het verschil tussen de twee structurele niveaus het bijkans uniforme verschil van circa 30 cm, bepaald voor $R > 4100$ m af te trekken. De zo verkregen stijghoogteverlaging stemt goed overeen met de resultaten van analytische formules en, vanaf de jaren tachtig, ook met die van deterministische modellen. Hiermee lijkt Maas (2012) het twintigjarige vraagstuk te hebben opgelost van de oorzaak van het verschil tussen de deterministische en statistische hydrologische methoden, c.q. tijdreeksanalyse. Dit laat natuurlijke de vraag naar de oorzaak van de achtergrondverlaging geheel open.

Is hier nu alles mee gezegd? Niet per se. Er resteert nog de vraag hoe die scherpe overgang tussen de twee takken van de verlaginglijn tot stand komt, De Glee versus Dupuit, die Van den Akker (2013) benadrukt. Ook prangt de vraag waarom Maas (2012) geen invloed vond van het sterk dynamische karakter van het grondwatersysteem rond Terwisscha, waarin de sloten 's zomers massaal droogvallen, en waardoor het verband tussen verlaging en stijghoogte niet-lineair is. De door Maas hier toegepaste tijdreeksanalyse is wel lineair (Maas, 2012), en zou dus eigenlijk niet mogen passen op de situatie in Terwisscha. We schuiven de beantwoording hiervan door naar een volgend artikel in dit Stromingen nummer (Olsthoorn, 2014), dat volledig is gewijd aan de dynamiek van de verlaging.

In voorliggend artikel wordt onderzocht in hoeverre de doorwerkcurve die Van den Akker (2013) voorstelt een verklaring van de achtergrondverlaging kan zijn. Tevens wordt onderzocht in welke mate de keuze van de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) de conclusies omtrent de verlaging van de grondwaterstanden kan bepalen.

Geldt de achtergrondverlaging die Maas (2012) bepaalde voor het spanningspakket ook voor het freatische pakket en omgekeerd? Behoudens invloed van diep ingesneden rivieren, kan gesteld worden dat een uniforme verlaging van de grondwaterstand voor 100% doorwerkt naar de onderliggende gespannen lagen. Omgekeerd hoeft dat niet het geval te zijn. Dus, zolang de achtergrondverlaging het gevolg is van alles wat van bovenaf de grondwaterstand beïnvloedt, werkt zij voor 100% door naar de diepe stijghoogte. Kees Maas (mondelinge mededeling, 2013) vond voor ondiepe peilbuizen dezelfde achtergrondverlaging, maar het beeld was veel rommeliger, wat te verwachten was omdat lokale bijzonderheden de grondwaterstand wel, maar de stijghoogte niet sterk beïnvloeden.

De Glee en Dupuit

Van den Akker (2013) analyseerde de oorzaken van achtergrondverlaging en meent dat deze wel degelijk het gevolg is van de grondwaterwinning. Hij meent ook dat de

methoden die de hydrologen toepassen onjuist zijn, omdat zij het freatische grondwater ten onrechte vast zouden houden: de hydrologen rekenen teveel met De Glee en te weinig met Dupuit. Bovendien vindt Van den Akker (2013) dat hydrologen die wel met Dupuit rekenen ten onrechte aannemen dat alle voeding over een rand met vaste straal komt. Zij negeren zo de verlaging op grotere afstanden dan de “ R van Dupuit”, en poetsen zo een deel van de verlaging door de waterwinning weg. Zij dopen die vervolgens gemakshalve achtergrondverlaging en schrijven die dan aan andere niet verder benoemde, laat staan gekwantificeerde, oorzaken toe. Hierdoor zou in dit land veel te weinig schadevergoeding aan agrariërs worden uitgekeerd. Van den Akker (2013) definieert vervolgens de TSV, de Toegevoegde Stijghoogte Verlaging, als zijnde het verschil tussen de verlaging die wordt berekend en de grotere verlaging die in de werkelijkheid zou optreden.

De toegevoegde stijghoogteverlaging, TSV

Afbeelding 2 geeft de twee situaties die in het betoog van Van den Akker (2013) centraal staan. Het betreft, net als in Terwisscha, een ondiep pakket met geringe doorlatendheid, dat via een weerstandslaag in verbinding staat met het regionale watervoerende pakket eronder (zie ook Afbeelding 9). Links staat de situatie waarbij de grondwaterstand wordt vastgehouden en rechts die waarbij de grondwaterstand deels meezakt met de verlaging van de stijghoogte in het regionale pakket. Voor de verdere analyse houden we aan dat in beide situaties, als gevolg van uitsluitend de verlaging van de stijghoogte, een extra neerwaartse flux Δq , [L/T] optreedt, als gevolg van de diepe waterwinning.

De grondwaterstand en de stijghoogte beschouwen we bovendien als gemiddeld over een bepaald gebied, zodat de details van individuele sloten buiten beschouwing mogen blijven. Zonder verlies aan algemene geldigheid stellen we gemakshalve dat zonder de onttrekking de grondwaterstand gelijk is aan de stijghoogte: er is dan dus geen lek of kwel.

De bovenste stippellijn in Afbeelding 2 links geeft de stijghoogteverlaging s_0 aan tijdens de onttrekking voor de situatie waarin de grondwaterstand niet meezakt. Om praktische redenen gebruiken we in het vervolg uitsluitend Δq en grondwaterdieptes beneden maaiveld in plaats van grondwaterstanden. Afbeelding 2 rechts geeft de situatie aan waarbij de grondwaterstand wel deels meezakt, namelijk van de begindiepte d_0 tot de einddiepte \bar{d} . De verlaging van de grondwaterstand is dus $\bar{d} - d_0$. De verlaging van de stijghoogte is s . Deze verlaging is s_0 groter dan de verlaging van de grondwaterstand omdat het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte s_0 in beide situaties dezelfde verticale lek Δq moet leveren. Aldus:

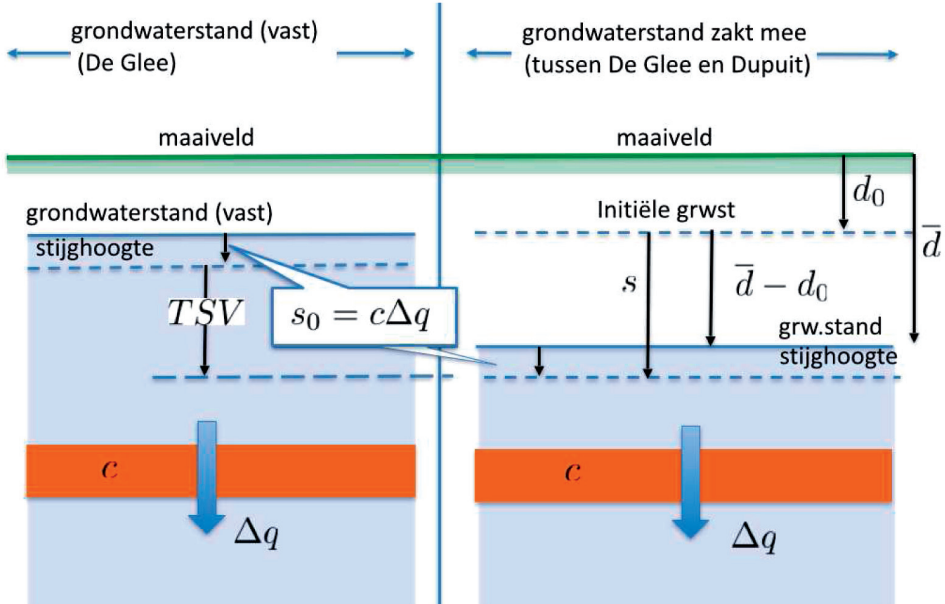
$$s_0 = s - (\bar{d} - d_0) = c\Delta q \quad (1)$$

met c de weerstand van de toplaag die we aan de onderzijde ervan geconcentreerd denken. Het verschil tussen de verlaging in de situatie met meedalend grondwater en de situatie met vast freatisch peil noemt Van den Akker (2013) de Toegevoegde Stijghoogte Verlaging (TSV). Deze is ook weergegeven in Afbeelding 2. Als we het

plaatje links met het plaatje rechts vergelijken, zien we onmiddellijk dat de TSV exact gelijk is aan de daling van het freatisch vlak:

$$TSV = \bar{d} - d_0 \quad (2)$$

De TSV is dus in feite geen nieuw begrip.



Afbeelding 2: Vergelijking van de situatie met en zonder vastgehouden freatisch peil.

Beide plaatjes gaan ervan uit dat de onttrekking volledig gecompenseerd wordt door extra voeding Δq van boven. Dat moet ook zo zijn in een stationaire situatie, waarin de voeding slechts kan komen van verminderde afvoer uit het freatisch pakket, toename van de aanvoer uit oppervlaktewater en reductie van de verdamping, waar de landbouwschade uiteindelijk uit voortkomt.

Bij gegeven lek Δq hangt de daling van de grondwaterstand samen met de intrede- en of uitredeweerstand tussen het grond- en het oppervlaktewater, en van het horizontale doorlaatvermogen de toplaag. Deze drainageweerstand is niet constant in de tijd in gebieden waarin het peil van de sloten niet kan worden beheerst, de vrij afwaterende gebieden die hier centraal staan. Bij dalende grondwaterstanden valt van lieverlee een steeds groter en deel van het drainagesysteem droog; al naar gelang het niveau en voor zover aanwezig zijn dit achtereenvolgens buisdrainage, greppels en sloten (zie voor een uitvoerige analyse Ernst, 1962, 1971 en De Vries, 1974a,b). Hierdoor neemt de drainageweerstand toe en zal het ondiepe grondwater steeds verder wegzakken om de opgelegde lek Δq uit het oppervlaktewater en verdampingsreductie te kunnen blijven leveren (zie voor de dynamica hiervan Olsthoorn, 2014). De mate waarin het freatisch vlak \bar{d} meezakt met de stijghoogte s noemt Van den Akker (2013) de doorwerking, F :

$$F = \frac{d\bar{d}}{ds} \quad (3)$$

Deze doorwerking hangt dus af van de diepte van de grondwaterstand. Hij varieert fysisch tussen minimaal 0 en maximaal 1. De waarde 0 treedt op wanneer het freatisch vlak wordt vastgehouden, en 1 wanneer het freatisch vlak in het geheel niet wordt vast gehouden, dus wanneer al het oppervlaktewater in de wijde omgeving zijn drainerende en aanvoerende werking heeft verloren. Hoe deze doorwerkingscurve F versus \bar{d} er in een praktijksituatie precies uitziet is onbekend. Hij zou stapsgewijs kunnen zijn bij het gelijktijdig droogvallen van discrete drainagesystemen, of bij benadering lineair of exponentieel. De fysische voorwaarden zijn echter dat F monotoon toeneemt met de diepte van de grondwaterstand en altijd tussen 0 en 1 blijft.

De doorwerkcurve

Van den Akker (2013) kiest voor de relatie tussen de doorwerking F en de grondwaterdiepte \bar{d} een min of meer arbitrair vloeiend verloop, dat na vervanging in zijn formule van grondwaterstand minus maaiveld door grondwaterdiepte $\bar{d} = mv - h$ en gelijkzetten van $b = 0$, vereenvoudigt tot

$$F = \frac{\bar{d}}{\bar{d} + a} \Delta q \quad (4)$$

Het verloop van deze kromme is grafisch weergegeven in Afbeelding 3. Het is duidelijk dat a gelijk is aan de grondwaterdiepte waarbij de doorwerking $F = 0.5$. Volgens deze formule is de doorwerking gelijk aan 0 wanneer de grondwaterstand aan maaiveld staat, dus als $\bar{d} = 0$. Deze doorwerkingsformule heeft bovendien een asymptoot gelijk aan 1 voor zeer diepe grondwaterstanden. In tegenstelling tot wat Van den Akker (2013) schrijft heeft de kromme geen asymptoot aan maaiveld, immers $dF / d\bar{d} = a / (\bar{d} + a)^2$ is $1/a$ voor $\bar{d} = 0$. Volgens de afgeleide heeft de curve nergens een horizontale asymptoot en is dus ook geen hyperbool, maar wel een mooi verloop.

Voor de horizontale asymptoot van de doorwerkcurve aan maaiveld die Van den Akker (2013) voorstelt is geen fysische reden aan te geven; de doorwerking is daar met zekerheid groter dan nul. De huidige curve voldoet daar aan. Verderop wordt in dit verband nog gewezen op het onderzoek van Ernst (1971), zie ook Afbeelding 7. De curve die Van den Akker (2013) kiest heeft in elk geval als voordeel dat hij zich goed leent voor wiskundig doorredeneren. Maar als we dat doen, betekent dit dat alle conclusies die we op grond daarvan trekken afhankelijk zijn van de min of meer arbitraire en a priori gemaakte keuze van het wiskundige verloop van de doorwerkcurve in vergelijking (4). Van den Akker (2013) rekent de verlaging voor die we krijgen als we de grondwateronttrekking door de waterleidingbedrijven uitsmeren over het gebied waarover in Nederland grondwaterpompstations voorkomen. De doorwerkcurve leent zich daar goed voor. De definitie van de $F = d\bar{d} / ds$ doorwerking krijgen we:

$$\frac{d\bar{d}}{ds} = \frac{\bar{d}}{\bar{d} + a} \quad (5)$$

Zodat:

$$ds = \left(1 + \frac{a}{\bar{d}}\right) d\bar{d} \quad (6)$$

en geïntegreerd:

$$s + C = \bar{d} + a \ln \bar{d} \quad (7)$$

De integratieconstante, C , kan worden bepaald door te stellen dat bij stijghoogteverlaging $s = 0$ de grondwaterdiepte gelijk is aan d_0 , de initiële grondwaterdiepte. Invullen van $c = d_0 + a \ln d_0$ levert de gezochte relatie tussen stijghoogteverlaging en grondwaterstandsval:

$$s - (\bar{d} - d_0) = a \ln \left(\frac{\bar{d}}{d_0} \right) \quad (8)$$

Hierbij is de term $\bar{d} - d_0$ opzettelijk naar links gebracht om de uitdrukking $s - (\bar{d} - d_0)$ te krijgen. Immers $\bar{d} - d_0$ is de daling van de grondwaterstand zodat $s - (\bar{d} - d_0)$ precies het stijghoogteverschil over de scheidende laag is, die de lek Δq teweeg brengt, dus:

$$s - (\bar{d} - d_0) = s_0 = c \Delta q \quad (9)$$

Dit is in Afbeelding 2 weergegeven en het verschil tussen de stijghoogteverlaging en de grondwaterstandsval is gelijk aan $s_0 = c \Delta q$. Brengen we s_0 naar links, dan ontstaat de equivalentie van de TSV die ook in Afbeelding 2 naar voren komt:

$$s - s_0 = \bar{d} - d_0 = TSV \quad (10)$$

We kunnen vervolgens vergelijkingen (8) en (9) aan elkaar gelijk stellen om een verband te krijgen tussen de grondwaterdiepte \bar{d} en de onttrekking Δq :

$$a \ln \frac{\bar{d}}{d_0} = c \Delta q \quad (11)$$

zodat:

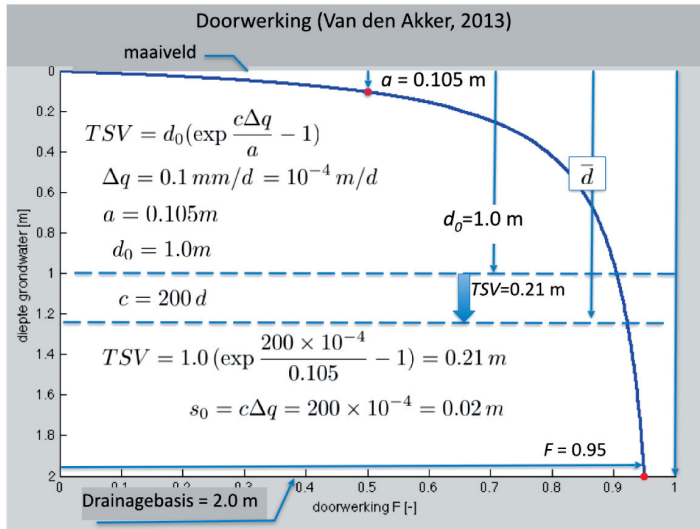
$$\bar{d} = d_0 \exp \left(\frac{c}{a} \Delta q \right) \quad (12)$$

De grondwaterdiepte blijkt nu evenredig aan de initiële grondwaterdiepte d_0 . Hij neemt verder niet-lineair toe met de onttrekking Δq . De grondwaterdiepte is ook afhankelijk van de weerstand van de scheidende laag c en de drainage diepte, die wordt gevangen in de coëfficiënt a , in feite de grondwaterdiepte waarbij de doorwerking $F=50\%$ is.

Gemiddelde verlaging door onttrekkingen in Nederland

Van den Akker (2013) geeft met behulp van deze formule een schatting voor de grondwaterstandsverlaging voor dat deel van Nederland waar grondwater wordt gewonnen voor de drinkwatervoorziening. Dat is globaal 250 km² bij een totale onttrekking van 800000 Mm³/a, wat ongeveer $\Delta q = 0.1$ mm/d oplevert. Van den Akker (2013) kiest verder 2 m als representatieve drainagebasis, waarbij hij de doorwerking stelt op $F=0.95$. Hieruit kan a worden berekend op $a = 0.105$ m. Bij een keuze van $d_0 = 1$ m als representatieve waarde voor de initiële grondwaterdiepte en $c=200d$ als representatieve

weerstand tussen de freatische laag en de aquifer, komt hij op een grondwaterstands-daling van 21 cm, die gelijk is aan zijn TSV. De stijghoogteverlaging is slechts 2 cm meer. Deze 2 cm is gelijk aan s_0 , het stijghoogteverschil over de weerstandslaag dat de lek veroorzaakt. Dit lijkt een zeer aanzienlijke verlaging, zeker ten opzichte van een situatie waarin het freatische grondwater zou (kunnen) worden vastgehouden.



Afbeelding 3: Doorwerk curve met de getalswaarden voor de berekening van de gemiddelde grondwaterstandsverlaging door de grondwaterwinningen in Nederland.

Omdat de verlagingformule niet-lineair is, wijkt de verlaging berekend op basis van de gemiddelden af van de gemiddelde verlaging die je krijgt als je de formule netjes zou integreren over de verlagingkegels in het land. Het zou in dit geval echter niet veel uitmaken omdat vooral de initiële grondwaterstand de doorwerking bepaalt, die, zo blijkt uit Afbeelding 3, al bij 90% begint en daaronder niet sterk meer toeneemt met de grondwaterdiepte; de gevoeligheid zit vooral in ondiepe grondwaterstanden waar de doorwerkcurve veel meer horizontaal verloopt.

Het is evenwel de vraag in hoeverre deze som hout snijdt. Hij is immers volledig afhankelijk van de gekozen doorwerkcurve, terwijl we niet weten hoe reëel die is. Van den Akker (2013) claimt min of meer universele geldigheid voor zijn curve voor de Nederlandse situatie. Praktisch is zo'n curve wel, want hij vraagt nauwelijks parameterwaarden.

Een bezwaar tegen de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) is dat hij al relatief grote waarden geeft bij geringe grondwaterdieptes, althans bij de waarde die Van den Akker (2013) kiest om de parameter a te bepalen. Gelijktellen van de doorwerking F aan 95% op een drainagediepte van, zeg 2 m, leidt tot een vlak verloop van de doorwerkcurve op geringe diepte onder maaiveld, waardoor een grote doorwerking in de orde van 90% wordt verkregen op diepten waar de grondwaterstand zich normaliter bevindt. Dit heeft navenant grote verlagingen als uitkomst. We gaan hier later verder op in, maar laten hierna eerst zien wat het gekozen verloop voor consequenties heeft voor de berekende verlagingen.

Grafische bepaling van de stijghoogteverlaging op basis van de doorwerkcurve

We laten nu zien dat de uitkomst erg afhangt van de gemaakte keuze van de doorwerkcurve. Omwille van de inzichtelijkheid en algemene geldigheid, doen we dit grafisch.

Als F de doorwerking voorstelt dan is $1-F$ de mate waarin de stijghoogteverlaging juist niet doorwerkt naar de grondwaterdiepte, dat wil zeggen de mate waarin het stijghoogteverschil tussen de toplaag en de aquifer wordt opgewekt: $1-F$ veroorzaakt het stijghoogteverschil en dus de lek. Aldus:

$$1 - F = \frac{ds_0}{ds} \quad (13)$$

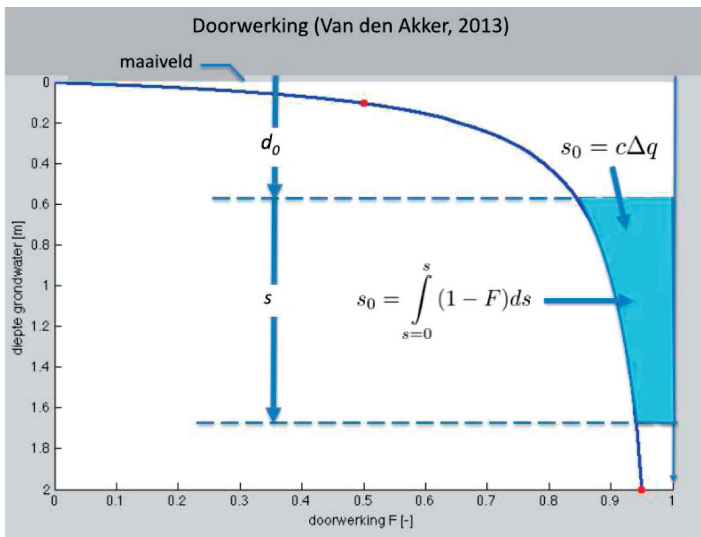
Zodat:

$$s_0 = \int_{s=0}^{s=s} (1 - F) ds \quad (14)$$

Waarin $s_0 = c\Delta q$ gegeven is en de stijghoogteverlaging s nog onbekend.

Hetzelfde resultaat wordt ook verkregen door netjes $1 - \frac{d\bar{d}}{ds} = 1 - F$ te integreren

en te constateren dat $d(s - (d - d_0)) = ds_0$ volgens vergelijking (9). Het belangrijkste van vergelijking (14) is dat we nu in staat zijn om de stijghoogteverlaging, s , grafisch te bepalen aan de hand van de doorwerkcurve. Afbeelding 4 toont dit, en laat verder dezelfde doorwerkcurve zien als hiervoor. Het gekleurde gebied is gelijk aan de integraal in vergelijking (14). Het gekleurde gebied is ook gelijk aan $c\Delta q$ en dus gegeven. De verlaging kan hierdoor grafisch worden bepaald door vanaf de initiële grondwaterdiepte d_0 een lijn naar beneden te trekken totdat het lichtblauw gekleurde oppervlak gelijk is aan $c\Delta q$. De lengte van de verkregen lijn is dan de stijghoogteverlaging, s ; de onderste stippellijn in Afbeelding 4 is dan de verlaagde stijghoogte.



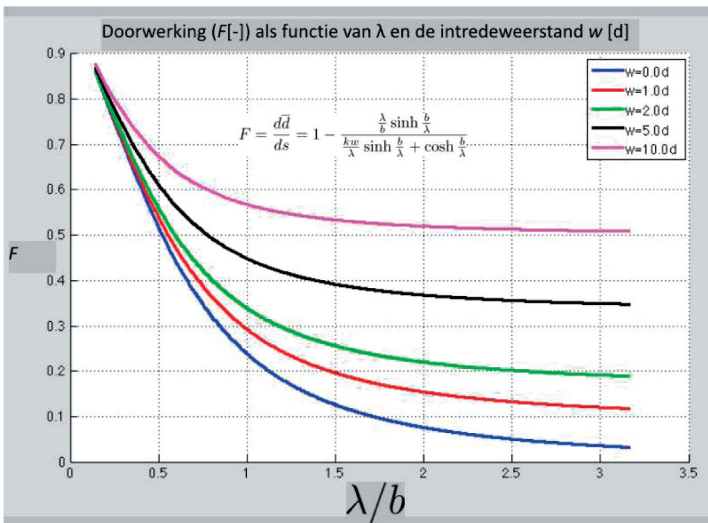
Afbeelding 4: Grafische bepaling van de stijghoogteverlaging.

Deze grafische bepaling is qua procedure onafhankelijk van de vorm van de doorwerkcurve.

Vergelijking met de veldsituatie, alternatieve doorwerking

Kijken we naar situaties in het veld, met percelen omgeven door sloten, dan kunnen we de doorwerking ook daarvoor uitrekenen, bijvoorbeeld in het geval dat slootpeilen strikt worden vastgehouden en het doorlaatvermogen van de bovenlaag constant mag worden genomen. De formule in Afbeelding 5 is voor dit afgeleid voor de gemiddelde grondwaterstand tussen perceelssloten bij gegeven lek Δq naar het diepe pakket, daarbij rekening houdend met de intredeweerstand van de sloten en de horizontale stroming door de bovenste laag mee te nemen, allemaal zaken waar de doorwerkcurve geen rekening mee houdt. In deze formule is k [L/T] de horizontale doorlatendheid van de bovenste laag, $\lambda = \sqrt{kDc}$ [L] de spreidingslengte van de toplaag met D [L] zijn dikte, b [L] de halve perceelbreedte en w [T] de intredeweerstand, die hier is geprojecteerd op de dikte van de toplaag. Deze intredeweerstand kan ook worden uitgedrukt in slootbodemweerstand en radiale weerstand.

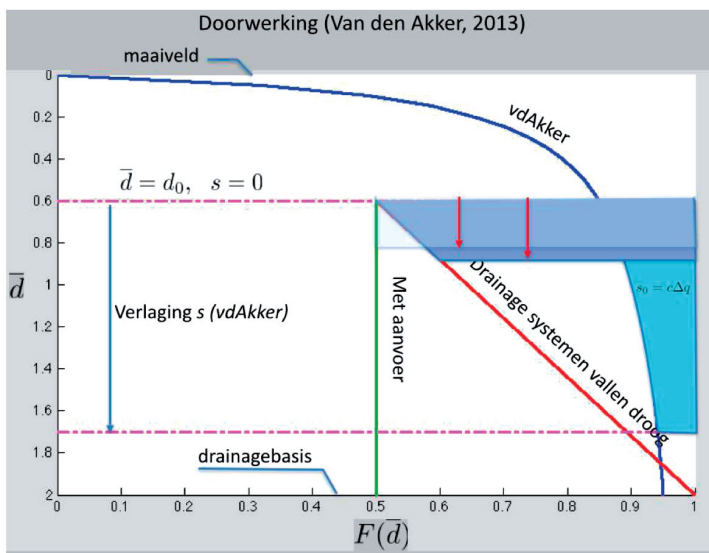
We zien aan de formule dat de doorwerking in dit geval constant is in elke gegeven situatie; er is geen relatie met de grondwaterstand, althans zolang het slootpeil beheerst is. De doorwerking is in Afbeelding 5 grafisch weergegeven door middel van de curven. Uit deze curven blijkt dat de doorwerking vermindert naarmate de spreidingslengte van het ondiepe pakket toeneemt, dat wil zeggen naarmate het grondwater gemakkelijker door de bovenlaag stroomt, respectievelijk naarmate de weerstand van de scheidingslaag groter is.



Afbeelding 5: Doorwerking bij sloten met vast peil en intredeweerstand k bij halve perceelbreedte b en spreidingslengte voor het bovenpakket gelijk aan λ .

Stel nu voor een bepaalde situatie in de praktijk dat $F=0.5$, overeen komend met een punt ergens midden uit de grafiek in Afbeelding 5. Wanneer de sloten alle peilbeheerst

zijn, dan is de doorwerking constant en onafhankelijk van de grondwaterdiepte. In een werkelijke situatie kunnen drainagemiddelen uitvallen naarmate de grondwaterstand daalt. Daarbij neemt de doorwerking toe, tot maximaal de waarde 1. Hoe de doorwerkcurve in dat geval precies verloopt weten we niet, maar we kiezen dit verloop voor dit voorbeeld lineair, zijnde het meest eenvoudig. De daling van de grondwaterstand wordt nu verkregen door het oppervlak tussen de doorwerkcurve en de verticale lijn $F=1$ gelijk te maken aan $c\Delta q$, net als dat in Afbeelding 4 is gedaan met de doorwerkcurve van Van den Akker. Afbeelding 6 laat zien dat verlaging van de grondwaterstand, aangegeven met langere rode pijl, in dat geval een factor 3 tot 4 kleiner is dan welke volgt uit de analyse met de doorwerkcurve van Van den Akker (2013). De korte rode pijl geeft de verlaging aan wanneer het slootpeil volledig wordt vastgehouden, behorend bij een doorwerkcurve die constant is, deze is in de afbeelding aangeduid met de tekst “Met aanvoer”.



Afbeelding 6: Verlaging bij verschillende doorwerkcurven, zie tekst.

Als we in de initiële situatie uitgaan van de aanwezigheid van watervoerende sloten, dan is de verlaging in nagenoeg alle gevallen belangrijk kleiner dan bepaald op basis van de doorwerkcurve van Van den Akker (2013). Dit betekent echter niet dat de doorwerking in reële situaties niet tegen de 100% zou kunnen lopen. Dat gebeurt namelijk in de zomer vaak wel (Olsthoorn, 2014).

De hier toegepaste lineaire benadering heeft als voordeel dat daarmee de werkelijke situatie met verschillende drainagebases in beeld te brengen zijn zonder arbitraire aannames ten aanzien van de doorwerking aan maaiveld.

Het is dus de vraag of de door Van den Akker (2013) gepresenteerde doorwerkcurve een goede algemene representatie is voor de doorwerking van stijghoogteverlaging naar grondwaterstands daling.

Discussie doorwerkcurve, vergroting van zijn geldigheid

Er bestaat uiteraard een directe relatie tussen de doorwerking volgens vergelijking (12) en de drainageweerstand. Om dit te zien schrijven we eerst de daling van de grondwaterstand als functie van de onttrekking Δq , en wel door de initiële grondwaterdiepte d_0 links en rechts van vergelijking (12) af te trekken:

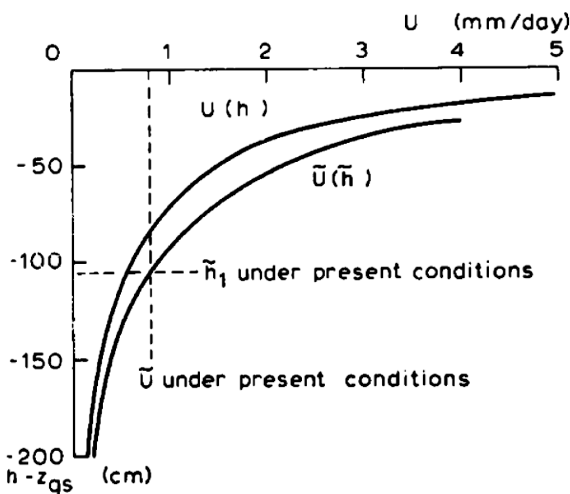
$$\bar{d} - d_0 = \left(\exp\left(\frac{c}{a} \Delta q\right) - 1 \right) d_0 \quad (15)$$

De drainageweerstand wordt nu gegeven door

$$c_d = \frac{d\bar{d}}{d(\Delta q)} = c \frac{d_0}{a} \exp\left(\frac{\Delta q}{a/c}\right) \quad (16)$$

Waarin c_d de drainageweerstand, dat wil zeggen de weerstand tussen sloten en de gemiddelde grondwaterstand in de toplaag. Dit betekent dat de doorwerkcurve equivalent is aan een drainageweerstand volgens vergelijking (16).

De reden van het groeperen van de variabelen in vergelijking (16) is dat nu a/c [L/T] vergelijkbaar is met Δq en dat evenredigheid met de verhouding d_0/a wordt benadrukt. Bijvoorbeeld, gebruik makend van de getallen in het voorgaande voorbeeld voor heel Nederland, geldt bij $\Delta q = 0$, dat wil zeggen een initiële grondwaterdiepte van $d_0 = 1$ m en $a \approx 0.1$ m, een drainageweerstand van tienmaal de verticale weerstand van de toplaag, dus $cd_0/a = 200 \times 1/0.1 = 2000$ d. Verder wordt de e-macht geschaald met $a/c \approx 0.1/200 = 0.005$ m/d oftewel met eenheden van 0.5 mm/d. Dus bij een onttrekking die equivalent is aan 0.5 mm/d wordt de hiervoor berekende drainageweerstand nog eens vermenigvuldigd met $\exp(1) \approx 2.7$ dat wil zeggen tot ca. 5500 d. Vergelijking (16) impliceert ook dat de drainageweerstand gelijk aan nul is wanneer het grondwater initieel aan maaiveld staat, dus wanneer $d_0 = 0$. Dit lijkt erg op de relatie tussen afvoer en grondwaterdiepte die ooit is uitgewerkt door Ernst (1971), zie Afbeelding 7. De drainageweerstand is gelijk aan de helling van de krommen in Afbeelding 7.



Afbeelding 7: Grondwaterafvoer U als functie van de grondwaterdiepte $\bar{d} = h - z_{gs}$ (fig. 6 uit Ernst, 1971).

Ernst (1971) wijst er overigens expliciet op dat aan het verloop van de krommen in Afbeelding 7 dicht onder maaiveld geen waarde mag worden gehecht.

Aangezien het in dit artikel specifiek om de verlaging gaat, doet het verloop van de curve boven de initiële grondwaterstand feitelijk niet erg ter zake; het gaat alleen om het verloop beneden \tilde{h}_1 in Afbeelding 7. De curve van Van den Akker (2013) is in feite consistent met Ernst (1971). Alleen de bepaling van parameter a is nog arbitrair, op basis van de veronderstelling dat de algemene drainagediepte in een gebied hoort bij een doorwerking van, in het voorbeeld 2 m, wat leidde tot een kleine waarde van parameter $a \approx 0.1 \text{ m}$ en tot zeer grote doorwerkfactoren van $F \approx 0.9$ bij relatief geringe grondwaterdieptes.

Als alternatief kunnen we de parameter a beter koppelen aan de drainageweerstand rond de gemiddelde grondwaterdiepte. Deze is af te leiden uit slootafstand en bodemeigenschappen. De formule in Afbeelding 5 geeft daarvan een voorbeeld.

De drainageweerstand bij de initiële grondwaterdiepte d_0 hoort bij de situatie zonder onttrekking, zodat $\Delta q = 0$. Vergelijking (16) reduceert daarmee tot:

$$c_d = c \frac{d_0}{a} \quad (17)$$

zodat de parameter a in de doorwerkcurve van vergelijking (5) kan worden berekend als:

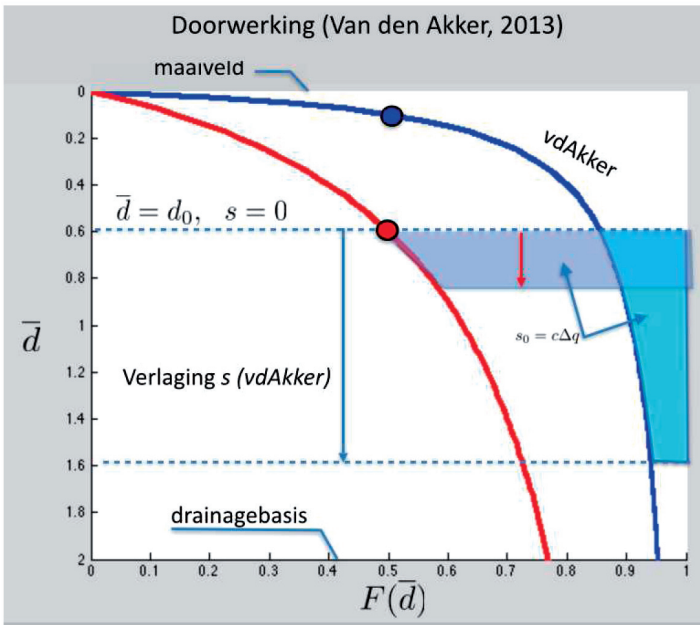
$$a = d_0 \frac{c}{c_d} \quad (18)$$

Hiermee voldoet de curve zowel aan drainageweerstand gelijk aan nul bij initiële grondwaterstand aan maaiveld, als aan de eis dat de doorwerking $F \leq 1$, en, tenslotte, aan de hydraulische waarde van de drainageweerstand rond de initiële grondwaterstand d_0 , die uit de veldgegevens volgt. Ernst (1962, 1971) geeft verschillende manieren om de drainageweerstand te berekenen; ook de formule in Afbeelding 5 kan worden gebruikt. Hoe dan ook, met de verkregen drainageweerstand voor de initiële grondwaterdiepte kunnen we de parameter a bepalen uit vergelijking (18) en daarmee de doorwerkcurve uit vergelijking (4).

Ter illustratie veronderstellen we, net als in Afbeelding 6 is gedaan, dat de doorwerking bij $\bar{d} = d_0 = 1.0$ gelijk is aan $F=0.5$, zodat parameter $a = d_0 = 0.6 \text{ m}$. Afbeelding 6 geeft het verloop van deze doorwerkcurve weer, samen met de oorspronkelijke uit Afbeelding 6. De verlagingen corresponderen nu echter met die waarvoor in Afbeelding 6 een lineaire doorwerkcurve is verondersteld.

Het betekent dus dat de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) goed valt te rijmen met een gegeven situatie onder voorwaarde dat hij wordt opgehangen aan de grondwateromstandigheden ter plekke. Het bezwaar aan de aldus aangepaste rode curve in Afbeelding 8 is dat de doorwerkcurve geen correspondentie meer heeft met de drainageniveaus die in de werkelijkheid voorkomen. Dit pleit er uiteindelijk voor om de doorwerkcurve maar gewoon lineair te nemen of te verdelen in lineaire stukken die wel overeenkomen met concrete drainageniveaus. Op deze wijze zijn alle veldgegevens in de curve te verwerken. De curve van Van den Akker (2013) heeft daarvoor een vrijheidsgraad te weinig. Als we dat niet doen, dan leidt de doorwerkcurve van

Van den Akker volgens vergelijking (5), maar nu met aangepaste parameter a , tot geringere verlagingen dan in het geval de doorwerkcurve lineair zou zijn gekozen.



Afbeelding 8: Verlaging bepaald met oorspronkelijke doorwerkcurve (blauw) met $a = 0.1$ en aangepaste doorwerkcurve (rood) met $a = 0.6$ m gebaseerd op een drainageweerstand bepaald uit veldgegevens. De verlaging is gelijk aan de hoogte van de gekleurde vakken die beide een oppervlak hebben dat gelijk is aan $s_0 = c\Delta q$.

Verlaging op afstand van het pompstation

Van den Akker (2013) probeert vervolgens een uitspraak te doen over de verlaging op grote afstand van pompstations. Hij concludeert aan de hand van zijn doorwerkcurve dat de weerstand tussen voedend oppervlaktewater en het grondwater toeneemt met de grondwaterdiepte, wat ook blijkt uit Ernst (1971). De weerstand wordt bij een asymptotische doorwerkcurve nooit oneindig; voeding blijft dus mogelijk. Echter, naarmate het stijghoogte in de buurt van de put progressief verder daalt, nemen de horizontale stijghoogtegradiënten in de aquifer toe en komt meer water over grotere afstanden toestromen. Dit impliceert dat er bij een niet-lineaire doorwerking geen vaste rand kan zijn waarachter de verlaging nul blijft; hoe meer grondwater wordt onttrokken, hoe groter de radius waarbinnen bijvoorbeeld 99% van de voeding afkomstig is. Uiteindelijk komt zo mogelijk veel meer water van heel ver weg en gaat de situatie steeds meer op die van Dupuit lijken, alleen nu niet met vaste radius.

Deze vergrote invloedstraal zou volgens Van den Akker (2013) door hydrologen zijn miskend. Hij is het dus oneens met de grens van ca. 4100 m die Maas (2012) voor Terwisscha bepaalde op basis van tijdreeksanalyse. Van den Akker (2013) meent dat hydrologen de grondwaterstandsdalingen op grote afstanden van een pompstation

wegpoetsen door die als achtergrondsverlaging te beschouwen, en dat zij daardoor op te geringe verlagingen uitkomen. Van den Akker (2013) meent ook, of juist, dat de verlagingen op grote afstanden van pompstations zoals bepaald door Maas (2012) geen achtergrondverlaging zijn, althans niet geheel, maar door de grondwateronttrekkingen worden veroorzaakt, en deze dus niet zomaar mogen worden afgetrokken van de verlagingen binnen de bekende en erkende invloedstraal van een pompstation.

Volgens Van den Akker (2013) werken hydrologen dit punt verder in de hand doordat zij de door hen bepaalde verlagingen lineair opschalen naar grotere, toekomstige onttekkings. Dit mag niet omdat met zijn doorwerkcurve de verlaging meer dan lineair toeneemt met het debiet, wat bij progressief droogvallende drainagemiddelen ook juist is. Het gevolg is, dat ook hierdoor verlagingen die de waterleidingbedrijven veroorzaken worden ontkend, respectievelijk onder het mom van achtergrondverlaging onder het tapijt worden geveegd.

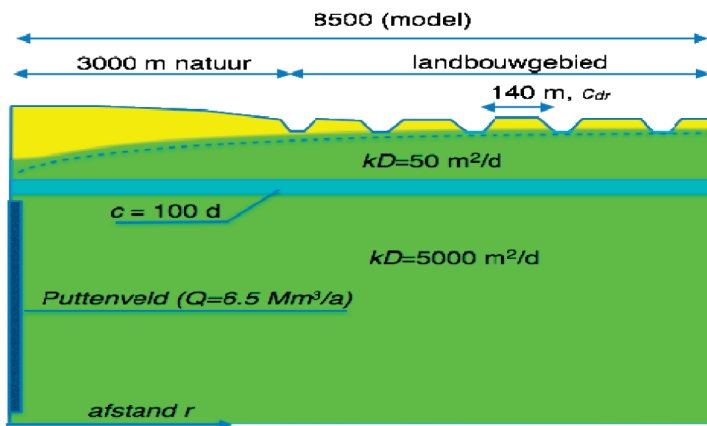
Om deze situatie goed te berekenen stelt Ernst (1971) een relatief eenvoudige aanpak voor. Hij deelt het gebied rond een winning op in een (of meer) zone(s) op afstand $>R$ waar de sloten nog wel draineren en een zone daarbinnen, waarin de sloten droog gevallen zijn. In het buitengebied geldt dat het grondwater wordt gevoed overeenkomstig de drainageweerstand ter plekke; voor het binnengebied geldt dat het grondwater niet wordt gevoed. Daar geldt analytisch derhalve de relatie volgens Dupuit. Het buitengebied kan in zoveel zones worden opgedeeld als nodig is om de verlopende drainageweerstand goed te kunnen beschrijven. Hierna dan de formule van De Glee worden gebruikt, of beter, de algemene analytische oplossing voor axiaal symmetrische

stroming, $s = AI_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right) + BK_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right)$ die bekend is uit boeken over grondwaterstroming

(Edelman, 1972), voor elke zone en de daarbij behorende drainageweerstand. De stijghoogten en volumestromen op de zonegrenzen zijn constanten die daarvoor moeten worden opgelost. Dit oplossen zal iteratief moeten geschieden omdat de drainageweerstand nu van de verlaging zelf afhangt, die niet van tevoren bekend is. Dit is redelijk gemakkelijk te doen, bijvoorbeeld in Matlab. Als we de goede relatie tussen verlaging en intredeweerstand in een grondwatermodel inbouwen, wordt het uiteraard nog wat eenvoudiger. Uit het artikel van Van den Akker (2013) bleek wel dat het niet eenvoudig is om een gesloten analytische oplossing voor de verlaging af te leiden die overal voldoet aan de doorwerkcurve. Hierna bouwen we de doorwerkcurve in een numeriek model om de invloed te demonstreren die de curve heeft op de verlaging op grotere afstanden van een onttrekking.

Rekenvoorbeeld Terwisscha, illustratie van de vergrote verlaging op afstand

Om de proef op de som te nemen volgt hier een numeriek voorbeeld, toegespitst op de situatie van Terwisscha zoals die door vroegere onderzoekers (RID, 1955, De Vries, 1974a) tot en met IWACO (1980) werd geschematiseerd. Deze situatie is weergegeven in Afbeelding 9, aangekleed met getalswaarden die zijn afgeleid uit de verschillende onderzoeksrapporten.



Afbeelding 9: Situatie Terwisscha (schematisch), axiaal symmetrisch.

De scheidende laag is in feite de weerstand van de toplaag die geprojecteerd is aan zijn onderzijde. Het gebied tot een afstand van 3000 m rond het puttenveld is natuur, daarbuiten is uitsluitend landbouw aanwezig. Alleen binnen het landbouwgebied zijn sloten aanwezig die het grondwater kunnen fixeren via de drainageweerstand c_{dr} . Omdat we de verlaging van de stijghoogte willen berekenen ten gevolge van de grondwaterwinning, laten we neerslag en verdamping buiten beschouwing. De drainageweerstand heb ik uitgerekend met de formule in Afbeelding 5 waarbij ook rekening is gehouden met de intredeweerstand en de radiale weerstand:

$$c_{dr} = \frac{2bw}{\Omega} + \frac{1}{\pi k} \ln\left(\frac{\pi D}{\Omega}\right) + c \left(\frac{b/\lambda}{\tanh\frac{b}{\lambda}} - 1 \right)$$

Met een slootafstand van $b/2 = 140$ m (Google Earth), en geschatte waarden voor de intredeweerstand van de sloten van $w = 0.5$ d, een natte omtrek van $\Omega = 1.5$ m, dikte toplaag $D = 30$ m, spreidingslengte toplaag $\lambda = 70$ m, horizontale doorlatendheid toplaag $k = 1.7$ m/d en verticale weerstand toplaag $c = 100$ d, kom ik op $c_{dr} = 132$ d (hier zie je maar weer eens dat de vuistregel die zegt dat de drainageweerstand gelijk is aan de slootafstand zo gek nog niet is).

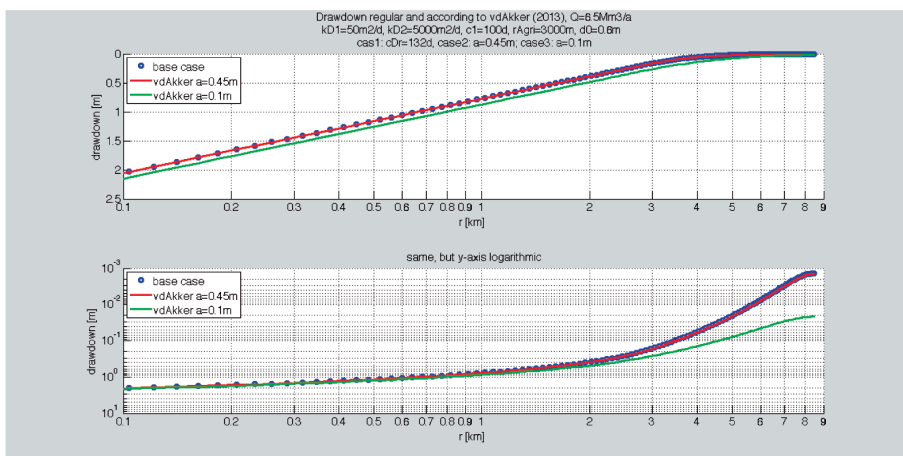
De totale weerstand tussen sloten en het regionale pakket wordt daarmee $c + c_{dr} = 100 + 132 = 232$ d. De onttrekking bedraagt $Q = 6.5$ miljoen m^3/a en is constant. Het model is dus stationair en zonder neerslagoverschot. De buitenrand van het model is op $R = 8500$ m gesteld en is dicht, zodat daar de verlaging wordt gemaximaliseerd. Deze radius is gebaseerd op representatieve afstanden tussen pompstations in Nederland en Friesland en bedoeld om de verlaging op afstand te maximaliseren door te doen alsof Terwisscha volledig is omringd door even grote onttrekkingen op circa 17 km afstand.

We maken hierna 3 berekeningen van de stationaire verlaging versus afstand tot de onttrekking. In de eerste wordt de drainageweerstand vastgehouden op 132 dagen binnen het landbouwgebied. Het resultaat komt dan overeen met de formule van

Dupuit binnen het natuurgebied $r < 3000 \text{ m}$ en met die volgens De Glee voor het landbouwgebied, $r > 3000 \text{ m}$, dat een totale weerstand heeft gelijk aan $c + c_{dr} = 232 \text{ d}$. In de tweede en derde berekening rekenen we met de intredeweerstand volgens de doorwerkcurve van Van den Akker (2013). Bij een gekozen initiële grondwaterdiepte van $d_0 = 0.6 \text{ m}$ hangt de doorwerkcurve alleen nog af van de waarde van parameter a in vergelijking (4). Deze parameter wordt in berekening 2 zodanig gekozen dat de drainageweerstand initieel eveneens 132 dagen is. Deze drainageweerstand neemt dan vanzelf toe met de lek (zie vergelijking (16)) die afhangt van de afstand tot de onttrekking. In de derde berekening kiezen we de waarde van parameter a gelijk aan die in het voorbeeld van Van den Akker (2013) voor heel Nederland, dat wil zeggen gelijk aan $a = 0.1 \text{ m}$, zoals afgeleid van een gekozen doorwerking van bij een grondwaterdiepte van $F = 0.95$ bij een grondwaterdiepte van $\bar{d} = 2 \text{ m}$. De derde berekening is de meest extreme situatie voor wat betreft de doorwerking. De waarde van a in berekening 2 volgt uit vergelijking (18)

$$a = \frac{c}{c_{dr}} d_0 = \frac{100}{132} 0.6 \approx 0.45 \text{ m}$$

De berekeningen worden uitgevoerd in Matlab met een axiaal-symmetrisch eindig differentiëmodel. Hierbij wordt de berekening een aantal keer herhaald, waarbij in elke iteratie de drainageweerstand wordt aangepast volgens vergelijking (16). Na bereiken van convergentie, in feite al na ca. 3 iteraties, wordt het resultaat getekend. Het resultaat is weergegeven in Afbeelding 10. Het verschil tussen de base case met vaste drainageweerstand van 132 d en geval 2 blijkt niet of nauwelijks zichtbaar. Dit komt omdat de drainageweerstand bij $a = 0.45 \text{ m}$ maar weinig oploopt met de diepte van de grondwaterstand in samenhang met de beperkte verlagingen in het landbouwgebied, dus voor $r > 3000 \text{ m}$. De drainageweerstand op $r = 3000 \text{ m}$ loopt door de verlaging daar op van 132 tot 152 d. Aan de buitenrand van het model, dus op $r = 8500 \text{ m}$ is de verlaging zo klein dat de drainageweerstand daar niet is toegenomen. Voor $r < 3000 \text{ m}$ is er geen voeding. In de derde berekening is het verschil groter. Daar is de drainageweerstand initieel 600 d, wat volgt uit een voorop gekozen waarde van $a = 0.1 \text{ m}$.



Afbeelding 10: Stationaire verlaging volgens de drie beschreven gevallen: boven lineaire y-as, onder logaritmische y-as.

Deze drainageweerstand loopt door de verlaging op van 600 tot 798 d op $r = 3000$ m. Aan de rand van het model, op $r = 8500$ m is de drainageweerstand dan opgelopen van 600 tot 618 d.

De maximale verlaging in het meest extreme geval, dat wil zeggen in berekening 3, wordt aan de gesloten buitenrand van dit model ca. 2.5 cm. Hiermee is duidelijk dat deze verlaging geen verklaring biedt voor de achtergrondverlaging van 30 cm die door Maas (2012) is bepaald op basis van zijn tijdreeksanalyse op door metingen bepaalde tijdreeksen.

Implementatie in modellen die in Nederland worden gebruikt

Natuurlijk is het zo dat door uitvallen van drainagemiddelen bij daling van grondwaterstanden de doorwerking toeneemt. Maar dat is geen nieuw gegeven. Alle belangrijke regionale modellen nemen deze verschijnselen al sinds jaar en dag mee. Wanneer de resolutie van een model het toelaat wordt open water daarin als afzonderlijke waterlopen meegenomen; wanneer de resolutie dat niet toelaat, worden de drainagemiddelen uitgesmeerd over modelcellen of elementen. In beide implementaties zakt het freatische grondwater mee met een verlaging van de diepe stijghoogte. De doorwerking volgt dan uit het model, namelijk uit de verhouding tussen grondwaterstandsverlaging en stijghoogteverlaging voor zover die door de onttrekking worden teweeg gebracht.

Ook het uitvallen van drainagesystemen bij toenemende verlaging wordt al vele jaren in de modellen meegenomen. In de regel wordt het oppervlaktewater van vrij afwaterende gebieden als een hiërarchie van drainagesystemen geïmplementeerd. Zodra het grondwaterniveau onder een drainageniveau zakt, worden de betreffende drainagemiddelen los van het grondwater gekoppeld, waarna het grondwater verder vrij uitzakt. Met andere woorden, de huidige modellen voldoen al aan het gedrag dat Van den Akker (2013) zo sterk benadrukt. Dat geldt ook voor de doorwerking die zij berekenen door middel van het laten uitvallen van drainagesystemen zodra het grondwater onder hun betreffende niveau daalt (aldus overeenkomstig mondelinge mededelingen van geïnterviewde collega's van RWS, Deltares, Tauw, Witteveen+ Bos, Haskoning, Waternet en Artesia).

Achtergrondverlaging

De vraag is of de hypothetische doorwerkcurve een voldoende verklaring geeft voor de achtergrondverlaging. Dat blijkt niet het geval; ook in de verlaging die bepaald wordt door de doorwerkingscurve van Van den Akker (2013) moet er een verband bestaan tussen deze verlaging en de afstand tot het pompstation, een relatie die niet blijkt uit de resultaten van Maas (2012) voor afstanden groter dan 4100 m. Die verlagingen van Maas (2012) zijn volledig op metingen gebaseerd, zonder dat daaraan een doorwerkcurve, analytische formule van Dupuit, De Glee of wat voor model dan ook te pas kwam. Anderzijds staat wel vast dat de doorwerking in vrij afwaterende gebieden toeneemt met de verlaging. Hetzelfde geldt voor de invloedstraal van het pompstation. Het niet-lineaire karakter van de doorwerking in vrij afwaterende gebieden diskwalificeert

het lineair extrapoleren van verlagingen naar stijgende onttrekkingen in de toekomst. Het zijn punten die allemaal waar zijn, maar tegelijk punten die in adequate grondwatermodellen worden meegenomen.

Dynamiek van de verlaging

Mijn grootste bezwaar is tegen verlagingberekeningen die ten onrechte uitgaan van een stationaire situatie, terwijl dit ontbreekt in vrij afwaterende gebieden zodra drainagemiddelen beginnen uit te vallen (Witteveen+Bos, 2007). In de situatie van Terwisscha bijvoorbeeld, waarin de sloten in de zomer droogvallen, breidt de verlaging zich daarna radiaal in alle richtingen uit, niet volgens Dupuit of De Glee, maar veel eerder volgens Theis. Het effect daarvan is tijdsafhankelijk. De uitbreiding stopt pas wanneer in het najaar het grondwater weer zover is gestegen dat sloten opnieuw gaan draineren. Deze dynamiek, van drainage in de winter en niet-stationaire radiale uitbreiding van de verlaging in de zomer, veroorzaakt een niet-lineair-gedrag waarin ook de verlaging zelf door het jaar heen varieert. Geen enkele stationaire benadering of stationair model doet echt recht aan deze dynamiek. Als we deze dynamiek in rekening brengen kunnen we de verlaging in situaties zoals die van Terwisscha wel goed beschrijven, vooropgesteld natuurlijk dat we de laagopbouw en hydraulische eigenschappen van het systeem voldoende kennen. Daarmee zijn naar mijn overtuiging ook de verschillende inzichten bij elkaar te brengen. Ik zal dit proberen aan te tonen in een apart artikel dat geheel aan de dynamiek van de verlaging is gewijd (Olsthoorn, 2014).

Conclusies

De doorwerkcurve die Van den Akker (2013) voorstelt als universeel verloop voor de doorwerking van stijghoogteverlaging naar grondwaterstandsverlaging geeft een relatief grote doorwerking bij geringe grondwaterdieptes. Deze is het gevolg van de vorm van de curve in combinatie met de keuze van 95% doorwerking als het grondwater is gezakt tot aan de regionale drainagediepte.

De doorwerkcurve kan worden aangepast aan de drainageweerstand die uit veldgegevens kan worden afgeleid, waarbij de overdrijving die nu optreedt verdwijnt. Ook worden daarmee consistente verlagingen verkregen rond de initiële grondwaterdiepte, maar deze passen dan niet goed bij de regionale drainagebasis omdat de doorwerkcurve van Van den Akker (2012) een vrijheidsgraad mist om tegelijkertijd aan drainageweerstand en drainagebasis te kunnen voldoen.

Er zijn andere doorwerkcurves mogelijk, gebaseerd op de hydraulische gegevens van de ondergrond en het oppervlaktewater. Door keuze van een lineair verloop of een verloop bestaande uit enkele rechte segmenten, bijvoorbeeld gekoppeld aan concrete drainage-niveaus, kan wel consistentie met veldgegevens bereikt worden en werkt daarom beter in de praktijk Ernst (1971).

De TSV, de Toegevoegde Stijghoogte Verlaging, die Van den Akker (2013) introduceerde is de verlaging van de stijghoogte bij meezakkende grondwaterstand ten opzichte van

de stijghoogteverlaging bij vastgehouden grondwaterstand. Deze TSV blijkt exact gelijk te zijn aan de verlaging van de grondwaterstand zelf en is daarmee geen nieuw begrip. Door de toename van de drainageweerstand met de verlaging, reikt de door Van den Akker (2013) afgeleide verlagingsslijn verder dan de verlagingen met een vaste drainage-weerstand. Deze verlagingen nemen echter wel af met toenemende afstand tot de onttrekking en bieden dus geen verklaring voor de constante achtergrondverlaging zoals bepaald door Maas (2012).

De verlagingsslijn die is gebaseerd op de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) geeft in het axiaal-symmetrische model van Terwisscha, zoals toegepast in dit artikel, verlagingen tot 2.5 cm op de gesloten buitenrand van het volgens de doorwerkcurve van Van den Akker (2013) aangepaste model op $r = 8500$ m. De doorwerkcurve van Van den Akker (2013) biedt daarmee geen verklaring voor de achtergrondverdroging, die volgens de analyse van Maas (2012) ca. 30 cm bedraagt.

Het vrij afwaterende grondwatersysteem rond Terwisscha is zeer dynamisch door elkaar opvolgende periodes met en zonder oppervlaktewater. In zo'n systeem varieert ook de verlaging tussen zomer en winter. Deze dynamische verlaging kan niet goed worden benaderd met stationaire analytische formules of stationaire modellen (Olsthoorn, 2014).

De tijdreeksanalyse geeft uiteindelijk de verlaging als verschil tussen de gemiddelde waterstand, c.q. het structureel niveau, tussen twee periodes. Ook hiermee wordt in feite de jaarlijkse dynamiek van de verlaging weggepoetst. Daarmee onderschat ook de tijdreeksanalyse de maximale verlagingen die optreden in de zomer, zoals zal blijken uit een volgend artikel, dat geheel gewijd is aan deze dynamiek (Olsthoorn, 2014).

De geraadpleegde collega's bevestigden door hun uitleg dat de huidige grondwatermodellen de noodzakelijke ingrediënten reeds bevatten die nodig zijn om adequaat verlagingen in vrij afwaterende gebieden te bepalen. Dit doen zij o.a. door het automatisch uitschakelen van drainagemiddelen zodra het grondwater onder het drainageniveau zakt dat hoort bij een specifieke groep drainagemiddelen, zoals drains, greppels, sloten e.d.

Dankzegging

Met dank aan Martin Knotters en Matthijs Bonte voor hun waardevolle commentaar, waardoor het artikel in duidelijkheid heeft gewonnen.

Literatuurverwijzingen

Van den Akker, C. (2013) Tussen Dupuit en De Glee: Het ontstaan van de Toegevoegde Stijghoogteverlaging; Stromingen, Vol. 19, Nr. 2, 5-23

Asmuth, J. von (2012) Groundwater System Identification through Time Series Analysis; PhD, TUDelft. ISBN 978-90-5155-079-5, 223p

Baggelaar, P.K. (1995) Waarom verschillen de door TGCB en TNO geschatte effecten

van de winning Terwisscha op de stijghoogte? Kiwa, Nieuwegein, Rapport KOA 95-067. 41pp+bijlagen.

Broers, H.-P., Lourens, A. en Van Geer, F.A. (1991) Optimalisatie van de grondwaterstandsmeetnetten rond pompstations in Friesland; Instituut voor Grondwater en Geo-Energie TNO, rapport nummer OS 91 22-A

Broers, H.-P. en Lourens, A. (1995) Nadere analyse van de verlaging van de grondwaterstand als gevolg van de winning Terwisscha in de omgeving van het bedrijf van de heer Weinans, Elsloo; TNO Grondwater en Geo-Energie. TNO rapport 95-08B

Edelman, J.H. (1972) Groundwater Hydraulics of Extensive Aquifers. ILRI, Bulletin 13, Wageningen, 216pp

Ernst, L.F. (1962) Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij de aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen; Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, Nr. 67.15. Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie. Wageningen. (Ook proefschrift aan RUU, 4 juni, 1962)

Ernst, L.F. (1971) Analysis of groundwater flow to deep wells in areas with a non-linear function for the subsurface drainage; Journal of Hydrology Vol. 14, p158-180

IWACO (1980) Geohydrologisch onderzoek naar de invloed van de grondwaterwinning op de grondwaterstanden ten gevolge van de huidige en uit te breiden winning van het pompstation Terwisscha. In opdracht van N.V. Waterleiding Friesland, Leeuwarden; Rapport 547. 29pp+bijlagen

Knotters, M. en Jansen, P. (2005) Honderd jaar verdroging in kaart; Stromingen, Vol. 11, Nr. 4, 19-32

Maas, C. (2012) Het geval Terwisscha; Stromingen, Vol. 18, Nr. 2, 43-76

Olsthoorn, T.N. (2014) De dynamica van de verlaging van Terwisscha of vergelijkbare situaties; Stromingen. Ingediend

Rolf, H. (1989) Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland; Onderzoek van DGV-TNO in opdracht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat

RID (1955) Rapport inzake de te verwachten verlaging van de grondwaterstand onder invloed van de waterwinning in de zandduinen te Appelscha door de N.V. Intercommunale Waterleiding Gebied Leeuwarden. Rijksinstituut voor Drinkwater-voorziening, 's-Gravenhage

VEWIN (2008) Drinkwaterstatistiek 2008. www.vewin.nl

Vries, J.J. de (1974b) The Groundwater Outcrop Erosion Model; evolution of the stream network in the Netherlands; Journal of Hydrology. 29 (1976) 43-50

Vries J.J. de (1974a) Groundwater flow systems and stream nets in the Netherlands; PhD. ISBN 90-6203-248-6, Editions Rudopi NV. 226pp

Witteveen+Bos (2007) Toetsing grondwaterstanden grondwaterwinning Pompstation Terwisscha; Dienst Landelijk Gebied Commissie Deskundigen Grondwater. 11pp + bijlagen.LW 133-9/eijj2/003, concept 01. Dec. 2006

