
Grondwaterwinningen nader beschouwd

Jaco van der Gaast¹

Inleiding

De afgelopen jaren zijn er binnen de hydrologie met enige regelmaat artikelen verschenen waarin een discrepantie tussen meetgegevens en berekeningen naar voren komt. Dit heeft geleid tot een aanhoudende discussie over de kwaliteit en bruikbaarheid van meetgegevens en rekenresultaten die middels modellen dan wel statistische analyses worden verkregen. De afgelopen jaren heeft deze discussie zich onder meer toegespitst op de zogenaamde achtergrondverdroging. Deze achtergrondverdroging is naar aanleiding van statistische modellering van tijdreeksen afkomstig van peilbuisgegevens in het eerste watervoerende pakket door Rolf (1989) geïntroduceerd. Hierbij is onder meer het volgende geconcludeerd: *Los van gebieden waar grondwaterwinning plaatsvindt en gebieden waar ruilverkaveling tot stand is gekomen, is ook in de rest van Hoog-Nederland vrij algemeen sprake van een gedaalde grondwaterstijghoogte van ca. 20 centimeter... Het is aannemelijk dat deze "achtergrondverdroging" zich indirect heeft gemanifesteerd via veranderingen van het peilregime in de Nederlandse beken als gevolg van opeenhoping van de effecten van verschillende menselijke ingrepen in het stroomgebied. De belangrijkste oorzaak van deze achtergrondverdroging moet worden gezocht in de toename van waterhuishoudkundige ingrepen in de eind 50-er en begin 60-er jaren.* Over deze achtergrondverdroging, die recentelijk ook wel achtergrondverlaging wordt genoemd (Van den Akker 2013), heeft de NHV een themabijeenkomst gepland. Dit artikel is geschreven naar aanleiding van de uitnodiging van de NHV om deel te nemen aan de discussie over achtergrondverlaging.

In recente artikelen over het fenomeen achtergrondverdroging wordt vaak een bepaalde benadering gehanteerd en worden analyses uitgevoerd die soms moeilijk op een eenduidige wijze met elkaar kunnen worden vergeleken. Om deze vergelijking beter mogelijk te maken worden in dit artikel getracht de verschillende methodes in kentallen naast elkaar te zetten teneinde een meer eenduidige vergelijking gemakkelijker te maken. Hiermee wordt, aanvullend op de artikelen van Maas (2012) en Van den Akker (2013), tevens getracht meer helderheid te creëren rond de kern van deze discussie over achtergrondverdroging teneinde helder te krijgen waar het uiteindelijk om gaat. Hierbij wordt tevens een alternatieve analytische methode gepresenteerd die sinds de jaren 60/70 van de vorige eeuw blijkt te zijn toegepast, waarmee het effect van grondwaterwinningen op zowel de stijghoogte in het watervoerende pakket als de freatische grondwaterstand kan worden gekwantificeerd.

¹ Jaco@vdGaast.nl

Theoretische achtergrond

Voor de stroming naar een pompput wordt in de praktijk vaak gebruik gemaakt van de onderstaande formules. Het betreft formules voor stationaire radiale stroming naar een put.

De formule van Dupuit kan worden gebruikt in een situatie waarin alleen horizontale stroming wordt aangenomen en luidt:

$$h = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{r}{R} \quad (1)$$

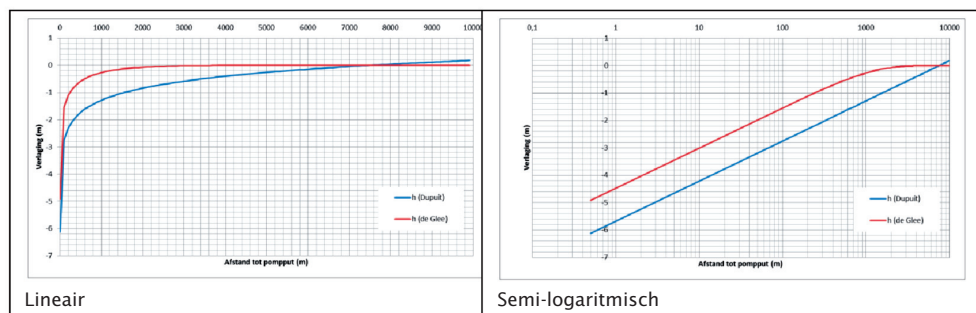
De formule van De Glee kan worden gebruikt in een situatie met een afdekkend pakket waarbij aangenomen wordt dat het oppervlaktewater watervoerend blijft en het freatische grondwaterpeil niet wordt beïnvloed en luidt:

$$h = -\frac{Q}{2\pi kD} K_0\left(\frac{r}{\sqrt{kDc}}\right) \quad (2)$$

Hierin is: h = de stijghoogte verlaging [m], Q = onttrekking door de pompput [m^3/d], kD = doorlaatvermogen van het watervoerende pakket [m^2/d], c = weerstand afdekkende pakket [d], R = afstand tot de voedende grens [m], r = afstand tot de pompput [m].

Om meer inzicht te krijgen in het verloop van de afpompkegel zijn beide formules voor de situatie uit het artikel van Van den Akker in één figuur weergegeven (Afbeelding 1). Van den Akker hanteert in het rekenvoorbeeld voor het doorlaatvermogen (kD) $5000 \text{ m}^2/\text{dag}$, voor de straal 8000 m en voor de spreidingslengte (λ) 1000 . Uitgaande van de formule voor de spreidingslengte ($\lambda = \sqrt{kDc}$) volgt hieruit dat voor de weerstand (c) een waarde van 200 dagen is gehanteerd. Ook Maas (2012) heeft in zijn artikel beide formules gebruikt, maar heeft in het merendeel van zijn figuren de afpompkegel semi-logaritmisch weergegeven. Daarom wordt voor de volledigheid het resultaat ook semi-logaritmisch weergegeven (Afbeelding 1).

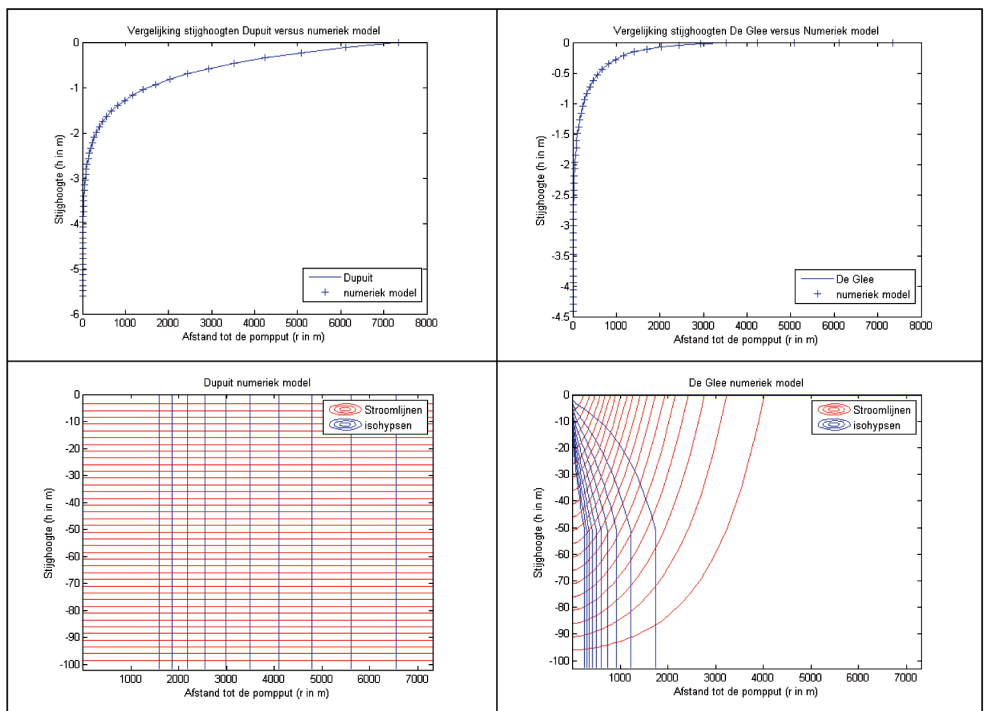
Indien beide formules worden vergeleken met een numeriek model blijken de resultaten goed met elkaar overeen te komen (Afbeelding 2). Deze vergelijking is uitgevoerd met Matlab en er is gebruik gemaakt van een syllabus (CT 5440) van de TU Delft (Olsthoorn,



Afbeelding 1: Verlagsingslijn van de stijghoogte in het watervoerende pakket als gevolg van een grondwaterwinning uitgaande van de door Van den Akker (2013) gehanteerde parameters: Q 7,3 miljoen m^3/jaar , kD $5000 \text{ m}^2/\text{dag}$, c 200 dagen, R 8000 m .

2009). Bij deze vergelijking is het wel van belang dat voor het numerieke model gebruik wordt gemaakt van de juiste randvoorwaarden.

Voor de formule van Dupuit is voor de zijrand een vaste stijghoogte opgegeven. Over de boven en onderrand kan geen stroming plaatsvinden waardoor conform de randvoorwaarde de stroming zuiver horizontaal is, hetgeen ook tot uiting komt in de horizontaal lopende stroomlijnen en verticaal lopende isohypsen (Afbeelding 2). Uitgaande van deze aanname kan er geen voeding van bovenaf plaatsvinden. Dit heeft tot gevolg dat de onttrokken hoeveelheid water in de formule van Dupuit theoretisch gezien eigenlijk van buiten de gehanteerde straal wordt onttrokken. Het verloop van de stijghoogte in horizontale richting, de afpompskegel, is het potentiaalverloop dat noodzakelijk is om de onttrokken hoeveelheid water bij de pompput te krijgen. De formule van Dupuit is dan ook identiek aan de formule van Thiem die gebruikt kan worden voor een grondwateronttrekking in een afgesloten watervoerende laag (Kruseman en de Ridder, 1970).

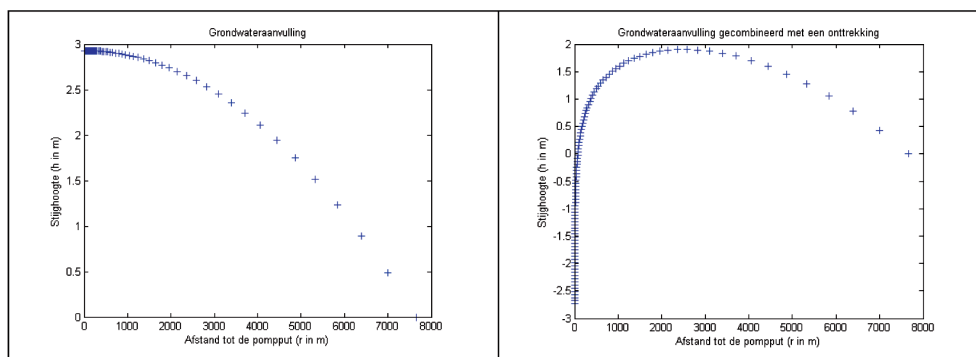


Afbeelding 2: Vergelijking van de verlagingsslijn van de stijghoogte in het watervoerende pakket als gevolg van een grondwaterwinning met een numeriek model (boven) en het stroomlijnen en isohypsen patroon (onder).

In werkelijkheid zal er onder Nederlandse omstandigheden in een freatisch watervoerend pakket zonder ontwateringsmiddelen, als gevolg van een neerslagoverschot, voeding plaatsvinden. Dit heeft tot gevolg dat er ook in gebieden zonder oppervlaktewater grondwateraanvulling plaatsvindt. Door een dikke onverzadigde zone kan deze aanvulling sterk vertraagd plaatsvinden. Deze grondwateraanvulling als gevolg van een neerslagoverschot kan in een stationaire situatie diepere pakketten aanvullen en/of ook in gebieden zonder oppervlaktewater worden afgevoerd. Als gevolg van het ontbreken

van ontwateringsmiddelen in de nabije omgeving vindt deze afvoer over grotere afstanden plaats, resulterend in een opbolling (Afbeelding 3). Deze opbolling is afhankelijk van de intensiteit van de grondwateraanvulling, de intensiteit waarmee eventuele diepere pakketten kunnen worden aangevuld, het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket en het peil alsmede de afstand tot een veraf gelegen ontwateringsmiddel. In het rekenvoorbeeld is voor de grondwateraanvulling 1 mm/dag, voor het doorlaatvermogen 5000 m²/dag, voor de afstand tot het ontwateringsmiddel 8000 meter en voor het peil 0 meter gehanteerd. Indien in een groot gebied, waar het oppervlaktewatersysteem in de uitgangssituatie niet aanwezig is, grondwater wordt onttrokken verandert de situatie. De grondwateronttrekking kan worden gezien als een artificieel ontwateringsmiddel die in plaats van horizontaal, verticaal is gesitueerd en een deel van de benodigde afvoer voor zijn rekening gaat nemen. Hierdoor zal de opbolling die in de uitgangssituatie nodig was om de afvoer te realiseren gaan veranderen (Afbeelding 3).

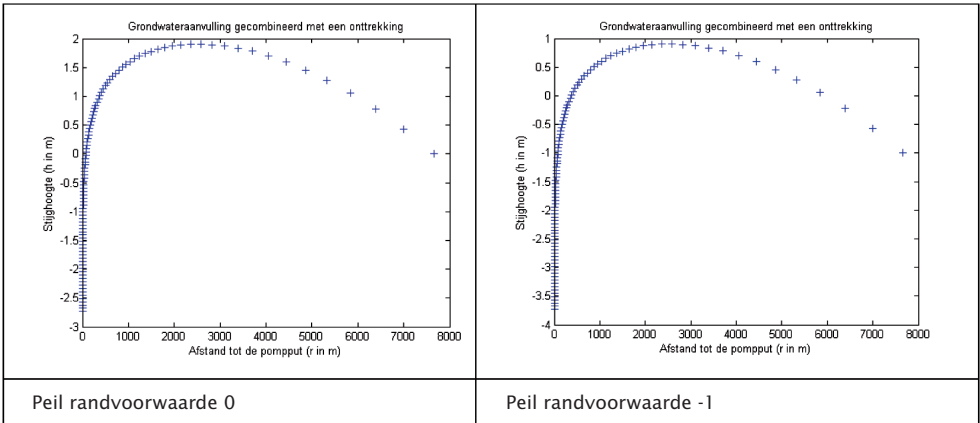
Indien in het rekenvoorbeeld naast de grondwateraanvulling een grondwateronttrekking (7,3 miljoen m³/jaar) wordt opgegeven zal er een nieuwe waterscheiding gaan ontstaan (Afbeelding 3). Van grondwater 'mining' is in deze situatie geen sprake. Deze waterscheiding bevindt zich op circa 2500 meter, waardoor de voeding in de vorm van de gehanteerde grondwateraanvulling van 1 mm/dag binnen de straal van circa 2500 meter in evenwicht is met de onttrekkingshoeveelheid. De verlaging als gevolg van de onttrekking zal echter wel verder reiken dan de nieuwe waterscheidingen. De oorspronkelijke opbolling is immers door het artificiële ontwateringsmiddel afgenomen en de hoeveelheid water die vanaf de nieuwe waterscheidingen via het oppervlaktewater moet worden afgevoerd is afgenomen. Dit heeft een verlaging tot gevolg die verloopt conform de formule van Dupuit en ook kan worden verkregen door de rekenresultaten voor de situatie met onttrekking (Afbeelding 3 rechts) in mindering te brengen op de rekenresultaten zonder onttrekking (Afbeelding 3 links).



Afbeelding 3: Stijghoogteverloop gebruikmakend van een radiaal numeriek model als gevolg van een alleen een grondwateraanvulling van 1 mm/dag (links) alsmede gecombineerd met een onttrekking (rechts).

In werkelijkheid zullen de stroomlijnen niet zuiver horizontaal zijn waardoor het stroomlijnen- en isohypsenpatroon eigenlijk niet voldoen aan de randvoorwaarde die gelden voor de formule van Dupuit. Ook aan het uitgangspunt dat het freatisch vlak in de uitgangssituatie horizontaal is wordt als gevolg van een opbolling niet voldaan. Deze opbolling is het resultaat van een weerstand tegen stroming naar een op afstand gelegen ontwateringsmiddel. Indien deze weerstand zou ontbreken zou het grond-

watervlak in de uitgangssituatie gelijk zijn aan het gehanteerde vaste peil aan de zijrand. Dit gehanteerde vaste peil is in hoge mate bepalend voor de berekende stijghoogte. Indien dit vaste peil worden verlaagd zal ook de berekende stijghoogte over het gehele gebied wordt verlaagd met de daling van deze randvoorwaarde (Afbeelding 4).



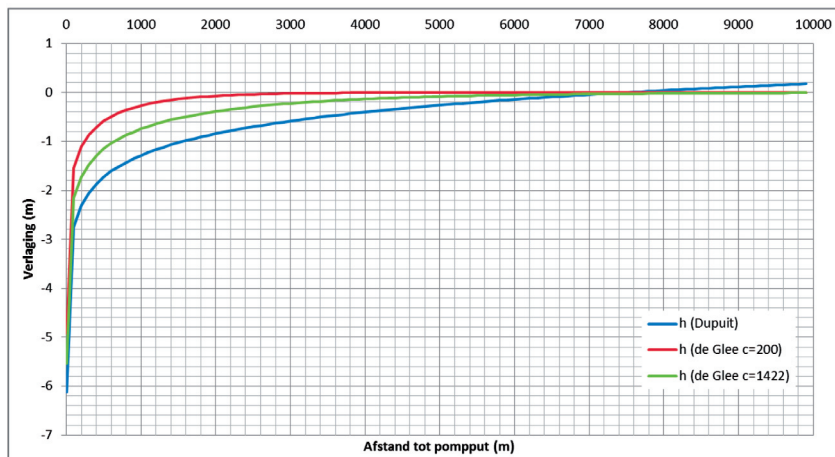
Afbeelding 4: Stijghoogteverloop gebruikmakend van een radiaal numeriek model als gevolg van een grondwateraanvulling van 1 mm/dag gecombineerd met een onttrekking (links) alsmede een verlaging van het peil van de randvoorwaarde met 1 meter (rechts).

Voor de formule van De Glee is voor de bovenrand gebruik gemaakt van een vaste stijghoogte. Hiermee wordt aangenomen dat het oppervlaktewaterpeil en de freatische grondwaterstand kan worden gehandhaafd. Dit heeft tot gevolg dat er van boven af voeding plaatsvindt, hetgeen tot uiting komt in het verloop van de stroomlijnen en het isohypsenpatroon (Afbeelding 2). Het verticale verloop van de isohypsen onder de diepte van 50 meter is niet correct en heeft te maken met de schematisatie van het rekenschema.

Uit de voorgaande afbeeldingen komt tevens naar voren dat de invloedsafstand van de onttrekking gebruikmakend van de gehanteerde parameters voor de formule van Dupuit dan wel De Glee van elkaar verschilt. Voor de formule van Dupuit is gebruik gemaakt van een straal van 8000 m. Uitgaande van de vuistregel dat het overgrote deel van een beïnvloeding binnen een afstand van 3 maal de spreidingslengte (λ) plaatsvindt, bedraagt de invloedsafstand uitgaande van de gehanteerde parameters in de formule van De Glee, 3 maal 1000 meter. Deze afstand van circa 3000 meter komt ook tot uiting in de afbeeldingen.

Uitgaande van de gehanteerde onttrekking van 7,3 miljoen m^3/jaar betekent het verschil in invloedsafstand (de straal R) dat binnen een straal van 8000 meter gemiddeld over het gehele oppervlak 36,5 mm/jaar wordt onttrokken en binnen een straal van 3000 meter 258 mm/jaar wordt onttrokken. Deze 36,5 mm/jaar komt overeen met de gelijkmatig verdeelde onttrekking van 0,1 mm/dag die in het artikel van Van den Akker wordt gehanteerd. De maat voor deze gelijkmatig verdeelde onttrekkingshoeveelheid is in hoge mate afhankelijk van de gehanteerde straal en kan derhalve gebruikt worden om de verschillende uitkomsten op een eenvoudige en tevens eenduidige wijze naast elkaar te zetten. Het verschil in straal en daarmee het verschil in de gemiddelde gelijkmatig verdeelde onttrekking voor het gehele gebiedsoppervlak kan worden verklaard aan de

hand van de aannames die samenhangen met de gehanteerde formule. In de formule van Dupuit wordt uitgegaan van een voeding afkomstig van de gehanteerde grens. In de formule van De Glee wordt er daarentegen van uitgegaan dat het oppervlaktewaterpeil constant blijft en dit oppervlaktewaterpeil de drijvende kracht is achter de voeding. De mate waarin er voeding plaatsvindt is afhankelijk van de gehanteerde weerstandswaarde (c). Doordat Van de Akker gebruik heeft gemaakt van een lage weerstand van 200 dagen is ook de beïnvloedingsstraal gering. Om gebruikmakend van de formule van De Glee op dezelfde straal van 8000 meter uit te komen dient de gehanteerde weerstandswaarde te worden verhoogd naar 1422 dagen. Indien de invloedsafstand van beide formules met elkaar in overeenstemming worden gebracht door de gehanteerde weerstandswaarde in de formule van De Glee te verhogen komt de verlagingcurve dichter bij de curve die verkregen wordt met de formule van Dupuit te liggen (Afbeelding 5).



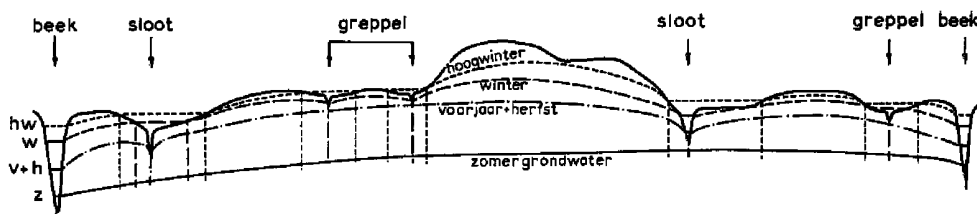
Afbeelding 5: Verlagsingslijn van de stijghoogte in het watervoerende pakket als gevolg van een grondwaterwinning voor de formule van Dupuit, De Glee gebruikmakend van een weerstandswaarde van 200 dagen en De Glee gebruikmakend van een weerstandswaarde van 1422 dagen.

Voedingsweerstand

Uit het voorgaande blijkt dat randvoorwaarden in hoge mate bepalend zijn voor het gebruik van de verschillende formules. Tevens blijkt dat een belangrijk verschil tussen beide formules voortkomt uit de wijze waarop wordt omgegaan met het oppervlaktewaterstelsel. In de formule van Dupuit wordt er van uitgegaan dat er tot aan een voedende grens geen oppervlaktewater aanwezig is danwel niet watervoerend is. In de formule van De Glee wordt aangenomen dat het oppervlaktewaterpeil en de freatische grondwaterstand kan worden gehandhaafd.

In werkelijkheid hebben we vaak te maken met een waterlopenstelsel dat fungeert als middel om bepaalde doelstellingen met betrekking tot het bodemgebruik te realiseren. In perioden met een neerslagoverschot dient het stelsel de overvloedige hoeveelheid water af te voeren en in perioden met een verdampingsoverschot vindt, indien mogelijk, wateraanvoer plaats. Met het waterlopenstelsel wordt er naar gestreefd de aan- en afvoer van water zodanig te reguleren dat er een voor het bodemgebruik afgestemde optimale grondwatersituatie ontstaat.

Van ontwatering is sprake, indien overtollig water aan de grond wordt onttrokken. De ontwateringsmiddelen die hiertoe, al dan niet in combinatie, kunnen worden toegepast zijn greppels, buisdrainages, perceel- en kavelsloten en beken. Onder natte omstandigheden zijn alle ontwateringsmiddelen watervoerend. De ontwateringsafstand en de drainageweerstand is hierdoor relatief gering. In drogere omstandigheden kan het detailontwateringsstelsel droogvallen, waardoor de ontwateringsafstand en de drainageweerstand toenemen (Afbeelding 6).



Afbeelding 6: Verkleining van de ontwateringsafstand bij stijgend grondwaterpeil (Bon, 1969).

De drainageweerstand, gedefinieerd als de weerstand tegen de grondwaterstroming naar open of gesloten leidingen, kan gezien het voorgaande dus in de tijd in hoge mate variëren. Door grondwateraanvulling stijgt de grondwaterstand. Indien de grondwaterstand stijgt tot boven de ontwateringbasis wordt een grondwaterstroming opgewekt naar de ontwateringmiddelen. Een deel van de grondwateraanvulling kan als wegzijging het gebied verlaten, of er kan kwelwater worden aangevoerd. Verschillen in oppervlaktewaterpeilen kunnen eveneens een grondwaterstroming opwekken. De freatische grondwaterstand is een resultante van de grondwateraanvulling, oppervlaktewaterpeilen, de drainageweerstand en de weerstanden tegen grondwaterstroming naar diepere pakketten.

Bij de berekening van effecten van ingrepen in het hydrologisch systeem is derhalve de weerstand van het systeem van belang. In de praktijk worden de begrippen drainageweerstand en voedingsweerstand gebruikt. Beide weerstanden verschillen van elkaar indien er sprake is van een weerstand biedende laag in de ondergrond. De drainageweerstand omvat de totale weerstand die de af te voeren hoeveelheid water ondervindt vanaf het freatisch vlak naar de waterlopen. De voedingsweerstand heeft betrekking op de totale weerstand tussen de waterlopen en het watervoerend pakket en is met name gedefinieerd om grondwaterstandsverlagingen te berekenen bij een onttrekking aan het watervoerend pakket (Technische werkgroep grondwaterplan, 1985). De voedingsweerstand is gelijk aan (Wit et al., 1991; Drecht, 1997) :

$$c_{voed} = \alpha c_d + c \quad (3)$$

Hierin is: c_{voed} = voedingsweerstand [d], α = vormfactor [-], c_d = drainageweerstand [d], c = weerstand van een weerstand biedende laag [d].

De drainageweerstand (c_d) omvat de totale weerstand die de afvoer van het neerslagoverschot ondervindt vanaf het freatisch vlak naar de waterlopen. Ernst (1983) geeft aan dat de drainageweerstand in vereenvoudigde vorm meegenomen kan worden in analytische berekeningen indien een afzonderlijke beschouwing van elk ontwatering-

In die gevallen waarbij de bovenlaag slecht doorlatend is met daaronder een watervoerend pakket met een hoog doorlaatvermogen, wordt voor de bepaling van de vervangende c -waarde de weerstand van het afdekkende pakket enigszins verhoogd aan de hand van de volgende formule (Afbeelding 7C):

$$c^* = c_0 + \alpha (c_h + c_r + c_i) \quad (6)$$

Indien de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket gering is kan deze laag, evenals bij situatie B in Afbeelding 3, weggelaten worden (Afbeelding 7D). Voor de bepaling van de vervangende c -waarde kan dan gebruik gemaakt worden van de volgende formule:

$$c^* = c_0 + c_1 + \alpha (c_h + c_r + c_i) \quad (7)$$

Uit het voorgaande blijkt dat de voedingsweerstand altijd hoger is dan de drainageweerstand. Het is dan ook opmerkelijk dat Maas (2008) tot de conclusie komt dat de voedingsweerstand altijd kleiner zou zijn dan de drainageweerstand. Voor een uitgebreide en meer complexe beschrijving over de voedingsweerstand, herkomst van de voedingsweerstand, en de relatie met de drainageweerstand wordt verwezen naar het artikel 'Modelconcepten voor de interactie tussen verzadigd grondwater en oppervlaktewater' (Groenendijk et al., 2002), de hierop volgende artikelen en artikelen van De Lange (1997). De voorgaande eenvoudige beschrijving van de voedingsweerstand is alleen van belang om aan te kunnen geven dat de voedingsweerstand in hoge mate afhankelijk is van de laagopbouw in de ondiepe ondergrond, de hiermee samenhangende doorlatendheden en weerstanden en de oppervlaktewatersituatie (slootafstanden en natte omtrek).

Hieruit komt tevens naar voren dat naast een ruimtelijke variatie in de voedingsweerstand deze weerstand ook in de tijd zal variëren. Ook Van den Akker geeft aan dat de doorvertaling van de verandering van de grondwaterstijghoogte op de freatische grondwaterstand een sterk niet-lineair karakter vertoont. Immers bij een daling van de grondwaterstand in een droge periode zullen steeds meer drainagemiddelen droogvallen, de ondiepere eerst totdat geen oppervlaktewater meer aanwezig is. In de praktijk zal dit betekenen dat dan alleen de beken nog watervoerend zullen zijn waardoor sprake is van een hoge drainageweerstand (Afbeelding 6). Dit aspect blijkt reeds uitgewerkt te zijn door Ernst (1967, 1971, 1978) waarbij ondermeer de niet-lineaire relatie is gelegd tussen de grondwaterstand en de drainageweerstand. Naast dit niet-lineaire aspect kan echter nog een ander aspect van belang zijn. Bij een dalende grondwaterstand kunnen namelijk weerstand biedende lagen in de ondiepe ondergrond in het onverzadigde traject terechtkomen waardoor deze lagen op dat moment niet meer van belang zijn voor de voedingsweerstand. Hierdoor kan bijvoorbeeld situatie C in afbeelding 7 overgaan in situatie A of B in afbeelding 7. Hierbij dient te worden bedacht dat in de sterk geschematiseerde afbeelding ook het aantal watervoerende waterlopen in een drogere situatie in veel gevallen afneemt. Een afname van het aantal watervoerende waterlopen heeft tot gevolg dat de grondwaterstroming naar het oppervlaktewater over een grotere diepte plaatsvindt. Hierdoor kan bijvoorbeeld situatie A in afbeelding 7 overgaan in situatie B in afbeelding 7, waardoor de voedingsweerstand toeneemt. Samenvattend komt het er op neer dat er in werkelijkheid een wisselwerking

zal zijn tussen de variatie in de oppervlaktewatersituatie in de tijd en het belang van de gelaagdheid in de ondiepe ondergrond, hetgeen de variatie van de voedingsweerstand in de tijd nog complexer maakt. Hierdoor komt eveneens de vraag naar voren of het hanteren van een overdrachtsfactor in de vorm van een hyperbool tussen de formule van Dupuit en De Glee toereikend zal zijn.

Vergelijking van eerdere resultaten

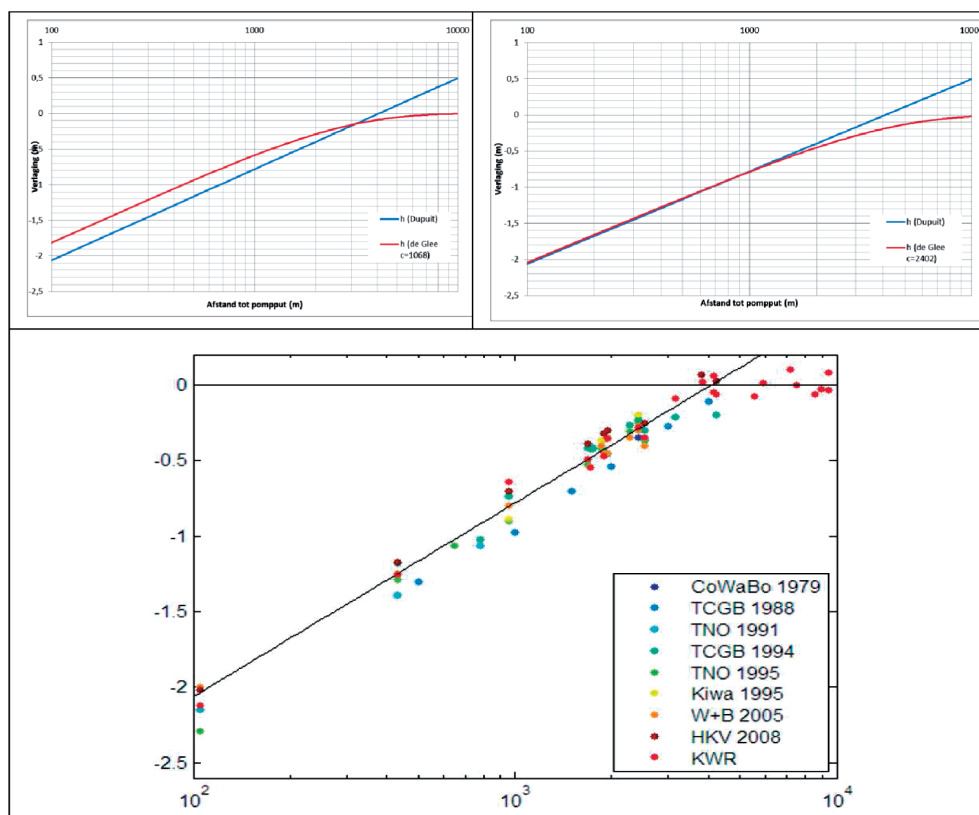
Uit het voorgaande blijkt dat naast de gelijkmatig verdeelde onttrekkingshoeveelheid als vergelijkingsmaat ook de gehanteerde spreidingslengte (λ) en het hiermee samenhangende doorlaatvermogen (kD) en weerstandswaarde (c^*) gebruikt kunnen worden om verschillende waarden onderling te vergelijken. Deze weerstandswaarde heeft zoals eerder aangegeven betrekking op de voedingsweerstand.

In het artikel ‘Valkuilen in de tijdreeksanalyse: Het geval Terwisscha’ van Maas (2012) zijn een groot aantal onderzoeksresultaten voor de grondwaterwinning Terwisscha uit het verleden gepresenteerd en visueel vergeleken. Om deze vergelijking op een meer getalsmatige wijze uit te kunnen voeren zijn de eerdergenoemde kentallen voor de in het artikel gepresenteerde onderzoeken waarvoor deze beschikbaar waren naast elkaar gezet (Tabel 1). Indien de kentallen worden vergeleken blijkt dat de gehanteerde straal met het hiermee samenhangende beïnvloede oppervlak in de latere onderzoeken toeneemt. Hierdoor neemt de gemiddelde onttrekkingshoeveelheid over het gehele oppervlak af. Tevens blijkt dat het gehanteerde doorlaatvermogen toeneemt en door de toename van de straal ook de gehanteerde weerstandswaarde (c) toeneemt. Evenals bij de visuele vergelijking in het artikel van Maas (2012) kunnen de onderzoeksresultaten grofweg worden onderverdeeld in twee groepen. Een groep, gebaseerd op analytische oplossingen, met een geringere beïnvloedingsstraal, waardoor de gemiddelde onttrekkingshoeveelheid uitgesmeerd over het gehele oppervlak hoger is en de gehanteerde weerstandswaarde lager is. Een tweede groep, gebaseerd op statistische tijdreeksanalyse, met een grotere beïnvloedingsstraal waardoor de gemiddelde onttrekkingshoeveelheid voor het gehele oppervlak laag is en de gehanteerde weerstandswaarde hoger is.

	RID (1955)	De Vries (1974)	CoWaBo (1979)	IWACO (1980)	TNO (1991)	HKV
Onttrekking (m³/jaar)	6500000	6500000	6500000	6500000	6500000	6500000
Straal (m)	3000	4000	3975	4500	7000	7000
Oppervlakte (m²)	28274334	50265482	49639127	63617251	153938040	153938040
Onttrekking (mm/jaar)	230	129	131	102	42	42
kD (m/d)	3550	4000	3550	4325	4400	5100
Lambda	1000	1333	1325	1500	2333	2333
C (dagen)	282	444	495	520	1237	1067
Type Benadering	Analytisch	Analytisch	?	Analytisch	Tijdreeks	Tijdreeks

Tabel 1: Getalsmatige vergelijking van een aantal onderzoeken naar het effect van de waterwinning Terwisscha die behandeld zijn in Maas (2012).

In de synthese komt Maas (2012) dan ook uit op twee resultaten die met betrekking tot het beïnvloedingsgebied sterk van elkaar verschillen (Tabel 2). Het gebruik van tijdreeksanalyse resulteert in een beïnvloedingsstraal van 7000 meter, een gemiddelde onttrekkingshoeveelheid van 42 mm/jaar en een voedingsweerstand van 1086 dagen. Het gebruik van analytische oplossingen resulteert in een beïnvloedingsstraal van 4080 meter, een gemiddelde onttrekkingshoeveelheid van 124 mm/jaar en een voedingsweerstand van 363 dagen. Uitgaande van een achtergrondverdroging kiest Maas er voor om de resultaten gebaseerd op tijdreeksanalyse te corrigeren waardoor de beïnvloedingsstraal 4080 meter, de gemiddelde onttrekkingshoeveelheid 124 mm/jaar en de voedingsweerstand 363 dagen zouden bedragen. Indien Maas gebruik zou hebben gemaakt van de formule van De Glee met een straal van 7000 m (3λ) en een bijbehorende weerstandswaarde van 1068 dagen, zou een deel van de verlaging op grotere afstand reeds zijn verklaard (Afbeelding 8). Indien de voedingsweerstand zou worden verhoogd naar circa 2400 dagen dan komt de berekende verlaging nabij de pompput overeen met de door Maas (2012) gehanteerde formule van Dupuit (Afbeelding 8). Dit heeft tevens tot gevolg dat zowel de berekende verlaging op grotere afstand als de beïnvloedingsstraal groter is. Deze hogere waarde voor de voedingsweerstand hoeft gezien het droogvallen van waterlopen en het voorkomen van weerstand biedende lagen (zowel keileem als potklei) niet onlogisch te zijn.



Afbeelding 8: Verschillende toepassingen van de formule van Dupuit en De Glee voor het waterwingebied Terwisscha ter vergelijking met de resultaten van Maas (2012).

Het is dan ook de gehanteerde keuze voor het gebruik van de formule van Dupuit die in hoge mate bepalend is voor de resultaten in het artikel van Maas (2012). Er wordt echter niet voldaan aan de randvoorwaarden die gelden voor de formule van Dupuit, waardoor deze beter niet kan worden toegepast.

Om de mate van de achtergrondverdroging nader te onderbouwen maakt Maas (2012) gebruik van een onderzoek van Knotters en Jansen (2005) met de titel "Honderd jaar verdroging in kaart". Dit onderzoek heeft echter geen betrekking op de verlaging in het eerste watervoerende pakket, maar op de freatische grondwaterstand. Hierdoor zijn de getallen niet vergelijkbaar. Tevens dient te worden opgemerkt dat de daling van de GHG en GLG in het onderzoek van Knotters en Jansen (2005) een gevolg is van zowel waterhuishoudkundige ingrepen als de toename van grondwateronttrekkingen. Hierdoor zal een aanzienlijk deel van de berekende daling van de GHG en GLG veroorzaakt zijn door grondwaterwinningen. Ook hieruit blijkt dat de berekende daling van de GHG van circa 30 cm en van de GLG van circa 50 cm geen betrekking hebben op de eventuele achtergrondverdroging. Temeer de daling van de GHG van 30 cm geheel zou bestaan uit de door Maas (2012) berekende achtergrondverdroging van 30 cm. Tevens dient te worden opgemerkt dat het de vraag is of de wijze waarop Knotters en Jansen (2005) de rekenresultaten hebben weergegeven, gebruikmakend van een grafiek met tijd-as, gezien de hierdoor opgeroepen suggestie dat er sprake is van een aanhoudende dalende trend, gerechtvaardigd is. Hierbij kan tevens worden opgemerkt dat naar aanleiding van een recent uitgevoerde trendanalyse in het beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel is aangegeven dat sinds 1995 de dalende trend is gestopt (Leunk et al., 2012).

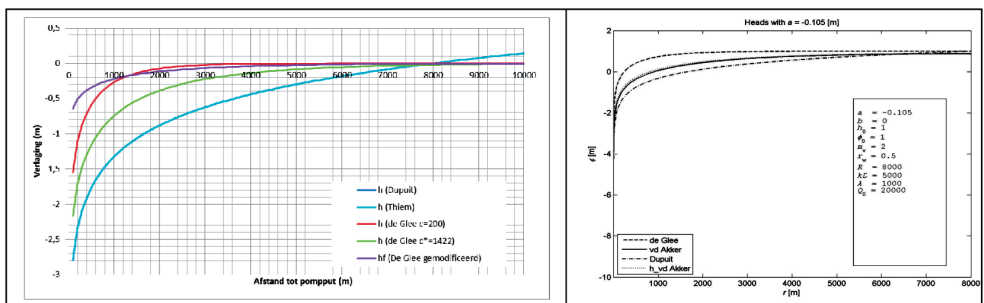
Indien de waardes die Van den Akker (2013) in zijn rekenvoorbeeld heeft gehanteerd zouden worden toegepast op de grondwaterwinning Terwisscha kunnen de volgende resultaten worden verkregen. Uitgaande van een gelijkmatig verdeelde onttrekking van 0,1 mm/dag bedraagt de straal, omgerekend naar een onttrekking van 6,5 miljoen m³/jaar, 7529 meter (Tabel 2). Van den Akker stelt voor om de analytische oplossingen te corrigeren middels een overdrachtsfactor, als zijnde de mate waarin een verandering van de stijghoogte wordt doorgegeven aan de freatische grondwaterstand. Zoals eerder aangegeven blijkt echter dat indien de beïnvloedingsstraal in de formule van De Glee

	Maas	Maas	Van den Akker	Van den Akker	Van den Akker
	Dupuit	Dupuit	Dupuit	De Glee	De Glee
Onttrekking (m3/jaar)	6500000	6500000	6500000	6500000	6500000
Straal (m)	7000	4080	7529	3000	7529
Oppervlakte (m2)	153938040	52296208	178082192	28274334	178082192
Onttrekking (mm/jaar)	42	124	36	258	36
kD (m/d)	5100	5100	5000	5000	5000
Lambda	2333,3	–	–	1000	2510
C (dagen)	1068	–	–	200	1260
Rekenaanpak	Tijdreeks	Analytisch	Analytisch	Analytisch	Analytisch

Tabel 2: Getalsmatige vergelijking van een aantal rekenresultaten naar het effect van de waterwinning Terwisscha die behandeld zijn in Maas (2012).

in overeenstemming wordt gebracht met de gehanteerde beïnvloedingsstraal in de formule van Dupuit het resultaat enigszins vergelijkbaar is met de formule die Van den Akker heeft opgesteld (Afbeelding 5). Dit kan worden gerealiseerd door de voedingsweerstand te verhogen van 200 naar 1260 dagen.

Zoals eerder aangegeven is de voedingsweerstand onder meer afhankelijk van de mate waarin ontwateringsmiddelen watervoerend zijn. Ook Van den Akker geeft aan dat de overdrachtsfactor afhankelijk is van de grondwaterstand omdat er bij een dalende grondwaterstand steeds meer sloten droogvallen. In een onderzoeksrapport met de titel 'verdroging door droge en natte rijksinfrastructuur in Overijssel en Gelderland' (van der Gaast en van Bakel, 1997) is afgeleid dat de mate waarin een verandering van de stijghoogte wordt doorgegeven aan de freatische grondwaterstand afhankelijk is van de verhouding tussen de drainageweerstand en de weerstandswaarde van het afdekkende pakket, die samen de voedingsweerstand bepalen. Later is deze methode gebruikt voor het beoordelen van vergunningaanvragen voor buisdrainage (van der Gaast en Stuyt, 2000), in het kader van bufferzonebeleid rond natuurgebieden (van der Gaast en Massop, 2003), in het kader van monitoring van verdroging (van der Gaast et al., 2005) en in het kader van concrete inrichtingsmaatregelen (Kiestra en van der Gaast, 2006; van der Gaast en Kiestra, 2008). Door gebruik te maken van deze methode kan naast de verlaging in het watervoerende pakket ook de verlaging van de freatische grondwaterstand worden berekend (Afbeelding 9). De methode blijkt in het kader van waterwinning reeds eerder te zijn toegepast (Ernst, 1971; van Rijsbergen, 1972; Ernst en Feddes, 1979). De gehanteerde parameterwaarden komen overeen met de waarden die Van den Akker in zijn artikel heeft gehanteerd. ($Q_0=20000$, $R=8000$, $kD=5000$, $\lambda=1000$, $c=200$). Hierdoor zijn de verlagingcurves voor Dupuit en De Glee identiek met de resultaten in het artikel van Van den Akker (Afbeelding 9).



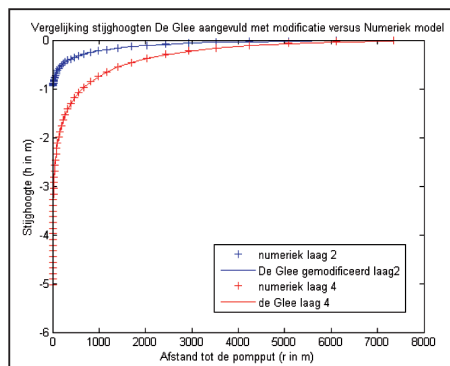
Afbeelding 9: Vergelijking van de berekende verlaginglijnen gebruikmakend van verschillende methoden voor zowel de stijghoogte in het watervoerend pakket als de verlaging van de freatische grondwaterstand.

In plaats van het hanteren van een overdrachtsfactor is voor de verlaging in het watervoerend pakket gebruik gemaakt van formule van De Glee met een vervangende c^* waarde van 1422 dagen, teneinde uit te komen op een beïnvloedingsafstand (R) van 8000 meter. Voor het bepalen van de verlaging van de freatische grondwaterstand is gebruik gemaakt van de gemodificeerde formule van De Glee (formule 8). Hierbij is voor de voedingsweerstand in de vorm van de vervangingsweerstand voor de drainageweerstand 422 dagen aangehouden en voor de weerstand van de weerstandsbiedende laag 1000 dagen aangehouden. Het rekenvoorbeeld heeft betrekking op een situatie

waarin bijvoorbeeld een laag keileem op enkele meters diepte voorkomt (Situatie B in Afbeelding 7). Uit de formule blijkt dat indien de voedingsweerstand geheel wordt bepaald door de drainageweerstand (Bijvoorbeeld situatie A in afbeelding 7) de verlaging van de freatische grondwaterstand overeen met de formule van De Glee (de factor $cd/(c+cd) = 1$). Indien de weerstand wordt veroorzaakt door een weerstandsbiedende laag en de drainageweerstand op 0 wordt gesteld vindt er geen verlaging van het freatisch vlak plaats en is het freatisch vlak gelijk aan het oppervlaktewaterpeil (de factor $cd/(c+cd) = 0$). Deze situatie komt overeen met de aanname bij de formule van De Glee dat het freatisch vlak niet wordt beïnvloed.

$$hf = - \frac{Q}{2\pi kD} K_0 \left(\frac{r}{\sqrt{kDc^*}} \right) \frac{(cd)}{(c + cd)} \quad (8)$$

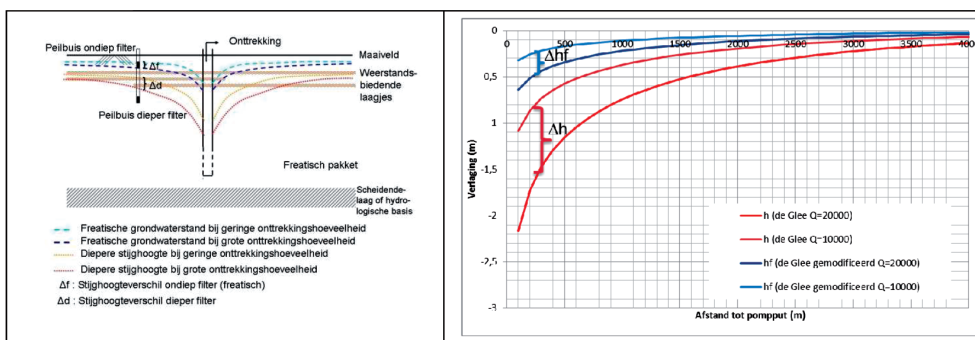
Indien de formule worden vergeleken met een numeriek model blijken de resultaten goed met elkaar overeen te komen (Afbeelding 10). Om deze vergelijking mogelijk te maken is het numerieke model in Matlab aan de bovenzijde uitgebreid met 2 lagen. Een laag van 1 meter met de drainageweerstand in de vorm van een diffuse bron (cd) en daaronder een dun watervoerend pakket van 1 meter met een doorlaatvermogen van $1 \text{ m}^2/\text{dag}$. Hierdoor is het mogelijk de verlaging van de freatische grondwaterstand als gevolg van een grondwateronttrekking ook met het numerieke model uit te rekenen.



Afbeelding 10: Vergelijking van de berekende stijghoogten met de formule van De Glee waarin gebruik is gemaakt van de voedingsweerstand en de freatische grondwaterstand met de gemodificeerde formule van De Glee met een numeriek model.

Indien bijvoorbeeld de onttrekkingshoeveelheid wordt gehalveerd van $20000 \text{ m}^3/\text{dag}$ naar $10000 \text{ m}^3/\text{dag}$ kan het effect van zowel de stijghoogteverandering in het watervoerende pakket als de verandering van de freatische grondwaterstand worden berekend (Afbeelding 11).

Uit de berekening blijkt dat een verandering in de onttrekkingshoeveelheid in het watervoerende pakket een grotere invloed heeft op de stijghoogte in het watervoerende pakket (Δh) dan op de freatische grondwaterstand (Δhf). Hieruit blijkt tevens dat, de situatieschets van Van der Gaast et al. (2008) waarin de effecten van een toename van een onttrekking op de grondwaterstand in relatie tot metingen met peilbuizen is weergegeven, via berekeningen kan worden gereproduceerd. Op deze situatieschets is indertijd gereageerd. In de reactie van Maas et al., (2008) is de stelling aangenomen dat het niet zou kloppen dat de feitelijke grondwaterstand minder sterk wordt beïnvloed



Afbeelding 11: Situatieschets (links) en rekenresultaten (rechts) van het effect van een verandering van de onttrekkingshoeveelheid op zowel de stijghoogte in het watervoerende pakket als de freatische grondwaterstand.

door een toename van een winningshoeveelheid dan de wat diepere stijghoogte die in een verkeerd gestelde freatische peilbuis kan worden waargenomen. Hierbij werd tevens gesteld dat het een conceptuele vergissing zou betreffen die in het hele artikel 'Oorzaak en gevolg van numerieke verdroging' doorwerkt en op verschillende plaatsen in het artikel tot onjuiste conclusies zou leiden. Dit is dan ook de aanleiding voor de door Van den Akker genoemde tamelijk felle discussie over het fenomeen achtergrondverdroging die in de afgelopen jaren onder hydrologen en ecologen heeft plaatsgevonden. Van der Gaast et al., (2008) hebben reeds aangegeven dat het de vraag is of de achtergrondverdroging met het oog op numerieke verdroging in het verleden goed is ingeschat. Aangezien de voedingsweerstand en daarmee de grondwateraanvulling wordt beïnvloed door gelaagdheid en de hiermee samenhangende anisotropie. Een geringere grondwateraanvulling heeft immers bij een gelijkblijvende onttrekking tot gevolg dat het onttrokken water uit een groter gebied afkomstig moet zijn, hetgeen overeenkomt met de grotere ruimtelijke interactie via het watervoerende pakket. Maas et al., (2008) hebben hierover indertijd gesteld dat de vraag of de achtergrondverdroging in het verleden goed is ingeschat een redelijke grond zou missen

Synthese

Aan de randvoorwaarden die gelden voor het gebruik van de formule van Dupuit wordt bij grondwaterwinningen in de meeste situaties niet voldaan, waardoor het gebruik van deze formule wordt ontraden. De formule van Dupuit is vooral toepasbaar bij het uitwerken van pompproeven. Bij pompproeven is de mate waarin niet voldaan wordt aan een aantal randvoorwaarden gezien de korte tijdsduur van een pompproef en het geringe beïnvloedingsgebied minder relevant.

Het gebruik van de voedingsweerstand in de formule van De Glee en het gebruik van een overdrachtsfactor zoals voorgesteld door Van den Akker heeft de functie van het oppervlaktewatersysteem bij grondwateronttrekkingen als belangrijke overeenkomst. Het gebruik van de voedingsweerstand in plaats van de door Van den Akker voorgestelde overdrachtsfactor heeft echter een aantal voordelen. De voedingsweerstand heeft een veel directere fysische grondslag waardoor deze eenvoudig kan worden

vergeleken met een numeriek model. Deze fysische grondslag heeft tevens tot gevolg dat parameterisering, mits de noodzakelijke gegevens beschikbaar zijn, gemakkelijker kan plaatsvinden. Daarnaast hoeft bij de parameterisering in tegenstelling tot de overdrachtsfactor op voorhand geen relatie met de grondwaterstand te worden gelegd. Terwijl de grondwaterstand de resultante is van het aanwezige oppervlaktewater-systeem (intensiteit en peilen), de weerstanden van de systemen, grondwateraanvulling en eventuele grondwaterwinningen. De formule van De Glee in combinatie met een voedingsweerstand danwel drainageweerstand wordt dan ook sinds de jaren 60-70 van de vorige eeuw toegepast. In deze periode heeft men ook gebruik gemaakt van een overdrachtsfactor, in de vorm van een verhouding tussen de drainageweerstand en de weerstand van een weerstand biedende laag, om het effect van een grondwaterwinning op de freatische grondwaterstand te kunnen bepalen.

Ook in situaties met wateraanvoer, waarbij de grondwaterstand lager is dan het oppervlaktewaterpeil (infiltratie), kan gebruik worden gemaakt van het hanteren een voedingsweerstand in de formule van De Glee. Het is de vraag hoe met deze situatie bij het gebruik van een overdrachtsfactor zoals voorgesteld door Van den Akker dient te worden omgegaan.

Achtergrondverdroging

Zowel het gebruik van de voedingsweerstand in de formule van De Glee als het gebruik van een overdrachtsfactor zoals voorgesteld door Van den Akker heeft tot gevolg dat de verlaging als gevolg van een drinkwaterwinning, zoals reeds eerder geconstateerd (van der Gaast et al., 2008), over grotere afstanden plaatsvindt. Hiermee kan de niet verklaarde grondwaterstands daling die aangeduid wordt met achtergrondverdroging in meer of mindere mate worden verklaard. Zowel de voedingsweerstand als de overdrachtsfactor worden beïnvloed door waterhuishoudkundige ingrepen. Dergelijke ingrepen beïnvloeden immers de drainageweerstand en/of oppervlaktewaterpeilen. De verbeteringswerken hebben tot gevolg gehad dat de landbouwkundige ontwatering door een intensiever drainagesysteem en de hiermee samenhangende verlaging van de drainageweerstanden is verbeterd. Hierdoor wordt in natte perioden het overtollige water sneller afgevoerd. Dit heeft tot gevolg dat de grondwaterstanden in een langere periode gedurende het jaar lager zijn geworden. Indien water door middel van een grondwateronttrekking wordt onttrokken zullen hierdoor de intensieve ondiepere oppervlaktewatersystemen sneller droogvallen. Dit heeft tot gevolg dat de drainage-weerstand gedurende een langere periode van het jaar is toegenomen. Uiteindelijk gaat het om een wisselwerking tussen ingrepen in een gebied, de mate waarin de afvoer hierdoor toeneemt waardoor de grondwateraanvulling wordt 'afgeroomd', eventuele wateraanvoer waardoor de grondwateraanvulling kan toenemen en de mate waarin de onttrekking via het droogvallen van waterlopen en/of weerstand biedende lagen van invloed is op de voedingsweerstand.

Discussie

In werkelijkheid is de waterhuishoudkundige situatie als gevolg van variaties in bodemgebruik, bodem, geologie, oppervlaktewatersituatie en grondwateraanvulling

in zowel ruimte als tijd veel complexer. Zo zal bijvoorbeeld het al dan niet voorkomen van potklei en/of keileem in het waterwingebied Terwisscha in hoge mate bepalend zijn voor de daadwerkelijke grondwateraanvulling. Ook het faseverschil tussen een neerslagrijke periode en de periode dat de grondwateraanvulling relatief hoog is kan in gebieden met een dikke onverzadigde zone van belang zijn. Door gebruik te maken van een grondwaterstromingsmodel kunnen ruimtelijke en temporele variaties gemakkelijker worden meegenomen. Voorwaarde hiervoor is echter wel dat het grondwatermodel op de juiste wijze wordt geschematiseerd en geparametriseerd. Uit een vergelijking in een ander gebied is echter gebleken dat het gebruik van grondwaterstromingsmodellen waarin de bodemgesteldheid en het voorkomen van weerstand biedende lagen onvoldoende wordt meegenomen de berekende grondwaterstandsverlaging als gevolg van een grondwateronttrekking niet op de juiste wijze wordt berekend (van der Gaast, 2012).

Conclusie

Door in de formule van De Glee gebruik te maken van de voedingsweerstand kan het effect van een grondwaterwinning op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket op eenvoudige wijze worden bepaald. Het uitbreiden van de formule van De Glee geeft tevens de mogelijkheid om de doorwerking van de verlaging in het eerste watervoerende pakket op de freatische grondwaterstand te berekenen, hetgeen van belang is voor schadeberekeningen.

Indien gebruik gemaakt wordt van de voedingsweerstand blijkt dat grondwateraanvulling onder droge omstandigheden vaak minder gemakkelijk plaatsvindt waardoor de verlaging als gevolg van een grondwaterwinning verder reikt dan tot nog toe veelal wordt aangenomen. Hierdoor kan tevens een deel van de tot nog toe gehanteerde achtergrondverdroging worden verklaard.

Dankwoord

De auteur wil Albert Poelman bedanken voor het attenderen op de beschikbare programmatuur en Syllabus van Theo Olsthoorn en hem tevens bedanken voor het opfrissen van het gebruik van Matlab.

Literatuur

Akker, C. van den (2013) Tussen Dupuit en De Glee: Het ontstaan van toegevoegde stijghoogte verlaging; Stromingen, jaargang 19, nr 2, pag 5-23

Bon, J. (1969) Topografie en vorm van het grondwatervlak als achtergrond van de te verwachten afvoeren in de Gelderse Achterhoek. Cultuurtechnisch Tijdschrift 8(3):1-14, 1969

Drecht, G. van (1997) Modellen voor diffuse ontwatering in de toplaag. In: Stromingen, jaargang 3, nr 2, pag 5-16

- Ernst, L.F.** (1967) Wateronttrekking door diepe putten. ICW.-Nota 353, Wageningen
- 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*, 14, 158-180
- Ernst, L.F.** (1978) Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables. *Journal of Hydrology*, 39, 1-50
- Ernst, L.F. en Feddes, R.A.** (1979) Invloed van grondwateronttrekking voor beregening en drinkwater op de grondwaterstand. ICW.-Nota 1116, Wageningen
- Ernst, L.F.** (1983) Wegzijing en kwel; de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden. ICW, rapport 7, Wageningen
- Gaast, J.W.J. van der en Bakel, P.J.T. van** (1997) Verdroging door droge en natte rijksinfrastructuur in Overijssel en Gelderland; een verkennende studie. Rapport 500, DLO Staring Centrum, Wageningen
- Gaast, J.W.J. van der en Stuyt, L.C.P.M.** (2000) Drainagevergunningen. Methodiek voor de beoordeling van aanvragen voor de aanleg van buisdrainage. Rapport 12, Alterra, Wageningen
- Gaast, J.W.J. van der en Massop, H.Th.L.** (2003) Spreidingslengte voor het beheersgebied van Waterschap Veluwe; Een maat voor het bufferzonebeleid. Alterra-rapport 653, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen
- Gaast, J. van der, Vroon, H. en Massop, H.** (2008) Oorzaak en gevolg van numerieke verdroging; in: *H₂O*, nummer 5 2008, pag 51-56
- Gaast, J.W.J. van der en Kiestra, E.** (2008) Bodemkundig-hydrologisch onderzoek in het kader van de inrichting van de EHS in de westelijke randzone van het Fochteloërveen. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 1722
- Gaast, J.W.J. van der** (2012) Numerieke verdroging en schadeonderzoek voor grondwateronttrekkingen. *Stromingen* 18(1): 21-34
- Groenendijk, P., Lange, W.J. de en Kovar, K.** (2002) Modelconcepten voor de interactie tussen verzadigd grondwater en oppervlaktewater; In: *Stromingen* jaargang 8, nr 2, pag 11-28
- Kiestra, E. en Gaast, J.W.J. van der** (2006) Bodemkundig-hydrologisch onderzoek in het landbouwgebied Tachtig Bunder. Ontwateringsadvies ter compensatie van veranderende hydrologische omstandigheden in het Compagnonsveld. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 1329
- Kruseman, G.P. en Ridder, N.A. de** (1970) Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen
- Knotters, M. en Jansen, P.** (2005) Honderd jaar verdroging in kaart; *Stromingen* 11(4) 5-18
- Lange, W.J. de (1997) Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel. Deel 1: De basis voor het modelconcept; in: *Stromingen*, jrg 3, nr 2, pag 17-28
- Leunk, Houten, G van den en Maas, K.** (2012) Trendanalyse grondwaterstanden

Waterschap Rijn en IJssel toont na vroegere verdroging nu stabilisering; in: H₂O, nummer 18 2012, pag 23-25

Maas, K., Asmuth, J. von en Runhaar, H. (2008) Kanttekeningen bij 'Oorzaak en gevolg van numerieke verdroging'; in: H₂O, nummer 9 2008, pag 22-24.

Maas, K. (2008) Drainageweerstand en voedingsweerstand van een freatische aquifer; In: Stromingen, jaargang 14, nr 2, pag 3-16

Maas, K. (2012) Valkuilen in de tijdreeksanalyse: Het geval Terwisscha. In: Stromingen, jaargang 18, nr 2, pag 43-76

Olsthoorn, T.N. (2009) Syllabus CT 5440 (Geohydrology 2) Your own Finite Difference Groundwater Model in Matlab (CT5440 exercises)

Rijsbergen, D. van (1972) Methoden ter berekening van de verlagingen van het freatisch vlak tengevolge van waterwinning. 's-Gravenhage, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Mededelingen 72-2

Rolf, H.L.M. (1989) Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland: analyse periode 1950-1986. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage

Schaaf, S. van der (1995) Snelle oudjes: Toepassing van Mazure's oplossingen voor eerste effectschattingen van waterhuishoudkundige veranderingen. In: H₂O, nr. 25, 750-753

Wit, K.E., Massop, H.Th.L. en Beest, J.G. te (1991) Relatie tussen oppervlaktewater en grondwater in de provincie Drenthe. Rapport 134, DLO Staring Centrum. Wageningen

