
Betekenis van Hooghoudt nog lang niet 'uitgehold'!

Jan van Bakel¹

De formule van Hooghoudt werd en wordt alom toegepast bij het ontwerpen van drainagesystemen. De formule houdt er rekening mee dat de drainageweerstand in meer of mindere mate afhankelijk is van de opbolling. In regionale studies wordt echter veelal uitgegaan van een constante drainageweerstand. Dat kan tot aanzienlijke systematische afwijkingen tussen gesimuleerde en werkelijk optredende variabelen zoals de grondwaterstand leiden. In een wat aangepaste vorm is de formule ook toepasbaar bij ontwerp en gebruik van drainagesystemen voor subinfiltratie. En als wordt bedoeld: drains gebruiken voor subinfiltratie, dus dan ook zo noemen.

Inleiding

Wie kent niet de Hooghoudt-vergelijking of heeft er tenminste van gehoord? Hooghoudt was een natuurkundige die zich toedeed op de agro- en geohydrologie en bouwde op deze terreinen een geweldige staat van dienst op. Helaas is hij te vroeg overleden. Voor een meer uitgebreide biografie verwijs ik naar www.grondwaterformules.nl

De naar hem genoemde vergelijking stamt uit het eerste jaar van WO-II, 1940 (Hooghoudt, 1940). Ik moet bekennen dat ik deze '*bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond*' een waar theoretisch meesterwerk vind dat vervolgens ook toepasbaar is gemaakt voor de praktijk. Ik raad iedere (agro)hydroloog aan hiervan kennis te nemen (www.debakelsestroom.nl). Zonder overdrijving is te stellen dat wereldwijd honderden miljoenen ha's zijn gedraineerd volgens 'Hooghoudt' en daarbij heeft het ILRI met name met de publicaties 15 en 16 een belangrijke rol gespeeld.

In regionale hydrologische numerieke modelcodes zoals MODFLOW wordt 'Hooghoudt' echter nauwelijks toegepast. De relatie tussen grondwaterstand en stroming naar elke type ontwateringsmiddel wordt daarbij gemodelleerd met één constante weerstand. Voor de modellering van de stroming van water naar buisdrainage in percelen die vooral boven drainniveau goed doorlatend zijn in vergelijking met de doorlatendheid beneden drainniveau is dat, zoals in dit artikel zal worden aangetoond, niet juist en is toepassing van 'Hooghoudt' in mijn ogen dus een must. Een andere reden om Hooghoudt weer onder de aandacht te brengen is het feit dat recent veel belangstelling is ontstaan om

¹ De Bakelse Stroom

(regelbare) (peilgestuurde) drainagemiddelen ook in te zetten voor de subinfiltratie van water in de bodem; in feite dus het omgekeerde van drainage. Dit type drainage wordt onderwaterdrainage genoemd en er is reeds een hele waslijst aan literatuur ontstaan op dit vlak, die voor een belangrijk deel op de Alterra website te vinden is. In plaats van opbolling treedt in de zomer met name uitholling van de grondwaterstand tussen de drains op. In dit artikel zal een ‘uitgeholde’ Hooghoudt- vergelijking worden gepresenteerd voor deze subinfiltratie situatie. Maar allereerst zal de ‘klassieke’ Hooghoudt worden behandeld.

Theorie

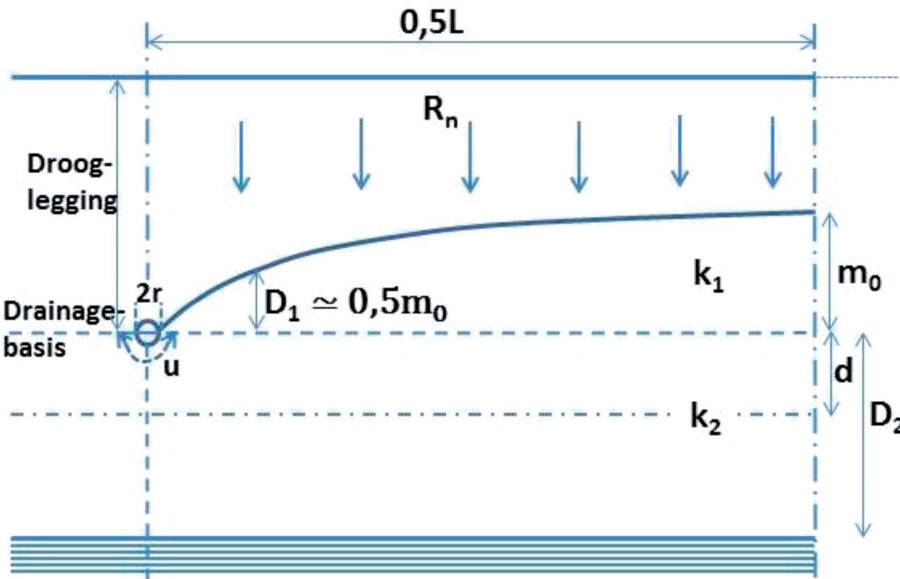
Klassieke vergelijkingen

De basisvergelijking voor een stationaire grondwaterstroming naar sloot of drain luidt:

$$q_d = \frac{8k_2dm_0 + 8k_1D_1m_0}{L^2}; m_0 \leq \text{drooglegging} \tag{1}$$

waarin q_d de afvoer per eenheid van oppervlak is (hierna aangeduid als afvoerintensiteit in m/d), gelijk aan de grondwateraanvulling R_N (indien geen kwel of wegzijging), k_1 en k_2 de verzadigde, horizontale doorlatendheid van de grond boven respectievelijk onder drainniveau zijn (m/d), D_1 de gemiddelde dikte van de watervoerende laag boven drainniveau is, D_2 de dikte van de watervoerende laag beneden drainniveau is (m), L is drainafstand (m) en d de dikte van de equivalentlaag (m). De breedte van drain of sloot is daarbij verwaarloosd.

Afbeelding 1 geeft een schematisch overzicht.



Afbeelding 1: Schematische voorstelling van de vergelijking van Hooghoudt voor grondwaterstroming naar drains.

De dikte van de equivalentlaag (d) is kleiner dan de dikte van de watervoerende laag beneden de drainagebasis (D_2). Hiermee wordt de radiale weerstand verdisconteerd: de extra stromingsweerstand als gevolg van de concentratie van de grondwaterstroming nabij sloot of drain. De dikte kan worden bepaald uit tabellen (zie bijvoorbeeld het Cultuurtechnisch Vademecum 'Oude Stijl') of kan worden berekend met (mits $D_2 < 1/4L$):

$$d = \frac{D_2}{1 + \frac{8D_2}{\pi L} \ln \frac{D_2}{u}} \quad (2)$$

waarbij u de natte omtrek is (m), ongeveer gelijk aan πr waarbij r de straal van de drain is (m).

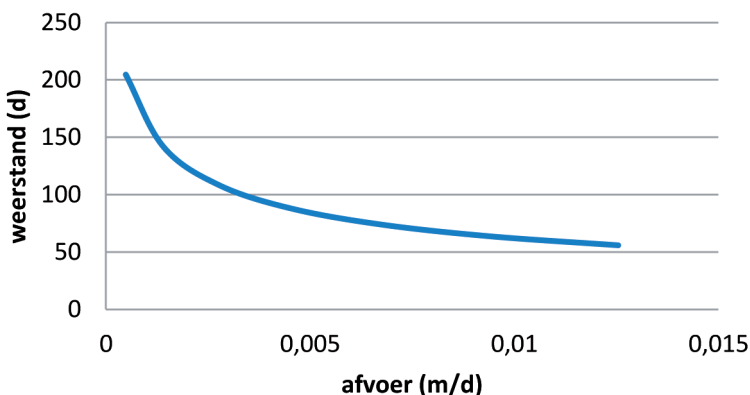
De dikte van het watervoerend pakket, D , hangt af van de grondwaterstand en is ongeveer gelijk aan $0,5m_0$, zodat vergelijking (1) overgaat in de meest gebruikelijke vorm:

$$q_d = \frac{8k_2 d m_0 + 4k_1 m_0^2}{L^2} \quad (3)$$

De drainageweerstand is volgens de definitie van Ernst (1962) gelijk aan het quotiënt van opbolling en bijbehorende afvoerintensiteit:

$$\frac{m_0}{q_d} = \frac{L^2}{8k_2 d + 4k_1 m_0} \quad (4)$$

Deze weerstand is derhalve niet constant maar neemt af bij toenemende afvoer c.q. opbolling. De mate waarin hangt af van de verhouding van de stroming boven en onder de drainagebasis. Voor een situatie met alleen stroming boven de drainagebasis is de weerstandsafname als gevolg van meer afvoer (en dus meer opbolling) weergegeven in onderstaande afbeelding.



Afbeelding 2: Voorbeeld van een relatie tussen drainageweerstand en afvoer voor een situatie met alleen stroming boven drainniveau.

In situaties met een dun watervoerend pakket beneden de drainagebasis of een geringe dikte van de equivalentlaag en/of een duidelijke lagere doorlatendheid ten opzichte van de doorlatendheid boven de drainagebasis is de drainageweerstand dus niet constant maar een functie van de opbolling c.q. de afvoerintensiteit.

Een ander belangrijk aandachtspunt is de omzetting van de opbolling midden tussen de drains of sloten naar een gemiddelde grondwaterstand. Daarvoor is door Ernst de vormfactor, η , geïntroduceerd, die is gedefinieerd als:

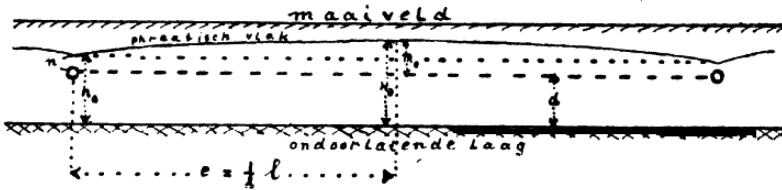
$$\eta = \frac{h_{gem}}{m_0} \tag{5}$$

waarbij h_{gem} de gemiddelde hoogte van de grondwaterstand ten opzichte van de drainagebasis is (m). De vormfactor is analytisch of numeriek af te leiden (Ernst, 1962).

De vormfactor is van belang bij hydrologische berekeningen waarbij wordt gerekend met de gemiddelde grondwaterstand van een perceel, grid of element. De drainageweerstand zoals hiervoor afgeleid moet dan worden verkleind met een factor η .

Stroming naar drains onder water

Bij regelbare (peilgestuurde) drainage liggen de drains onder water, aangeduid als peilopzet h_p , en moet de opbolling dus verminderd worden met deze peilopzet. De stromingssituatie is zoals in afbeelding 2 weergegeven (origineel uit Hooghoudt, 1940). Ook is de vergelijking van Hooghoudt daaronder weergegeven (peilopzet hierin n genoemd), die te beschouwen is als de meer algemene vorm van de vergelijking van Hooghoudt.



Figuur 23

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de strooming van het water boven het vlak door de drains ten gevolge van de relatief groote werving van het phreatisch vlak boven genoemd vlak niet te verwaarlozen is en de grond tot een bepaalde diepte homogeen doorlatend is en daaronder ondoorlatend is

$$s = \frac{8kd(m_0 - n) + 4k(m_0^2 - n^2)}{l^2} \tag{97}$$

Voor andere ontwateringssystemen wordt m_0 gerekend vanaf het verbindingsvlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen (voor praktisch droge greppels vanaf het vlak door de bodems van deze greppels) en is $n = 0$, waardoor de vergelijking 97, evenals in het geval dat geen water boven de drains voorkomt, overgaat in:

$$s = \frac{8kd m_0 + 4k m_0^2}{l^2} \tag{98}$$

Afbeelding 2: Stromingssituatie inclusief de algemene vorm van de vergelijking van Hooghoudt, overgenomen uit Hooghoudt (1940)..

Let op: in de tweede term van vergelijking (97) moet men niet $(m_0 - h_p)^2$ nemen maar $m_0^2 - h_p^2$.

Stroming vanuit drains onder water: 'uitgeholde' formules

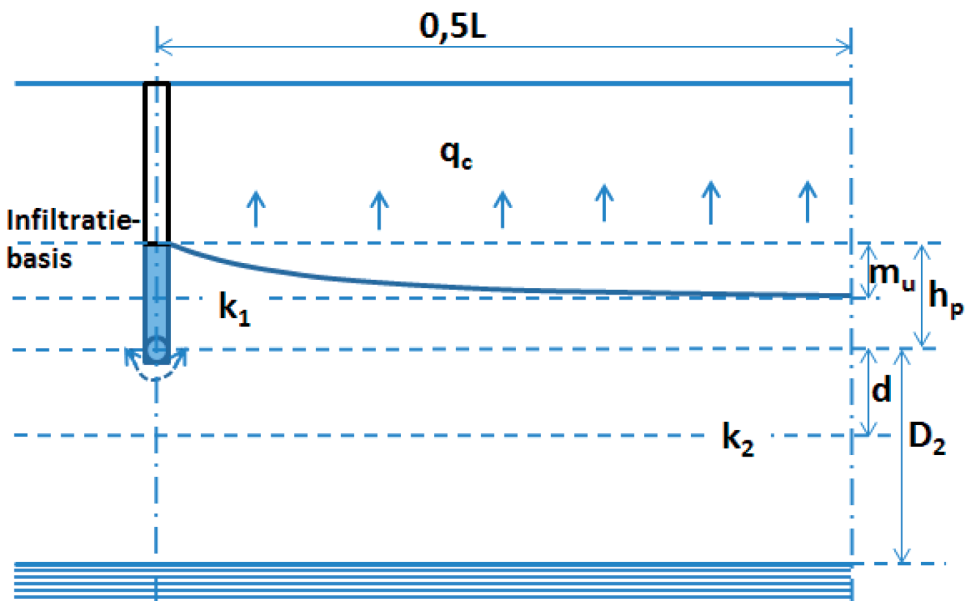
Voor de afleiding van de vergelijking van Hooghoudt voor subinfiltratie via drains cq. onderwaterdrainage worden de volgende aannames gedaan:

- De infiltratiebasis is gelijk aan de hoogte van de waterstand in de drainbuis;
- Er is geen uittreweerstand. Zie verder discussie;
- De dikte van de equivalentlaag is gelijk voor drainage en infiltratie;
- De uitholling is gelijk of minder dan de hoogte van de infiltratiebasis boven drain-niveau, aangeduid als peilopzet.

De volgende vergelijking is daarvoor geldig (zie ook afbeelding 2):

$$q_i = \frac{8k_2dm_u + 8k_1(h_p - m_u)m_u + 4k_1m_u^2}{L^2}; m_u \leq h_p \quad (6)$$

waarin q_i de infiltratie-intensiteit is (gelijk aan de capillaire opstijging, q_c) (m/d), h_p de peilopzet (m) en m_u de uitholling (m). Zie ook afbeelding 3 voor nadere toelichting.

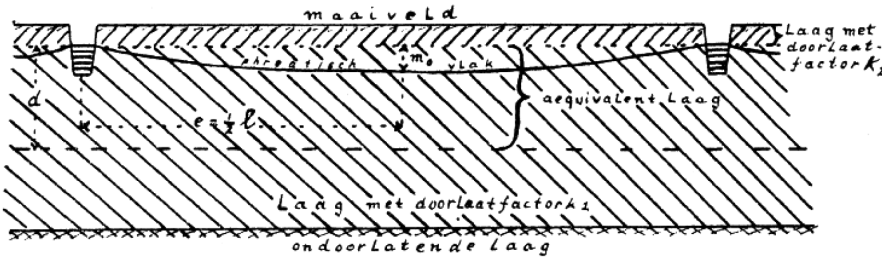


Afbeelding 3: Schematische voorstelling van 'Hooghoudt' voor subinfiltratie.

Ter toelichting:

- De eerste term heeft betrekking op de stroming beneden drainniveau: op het minteken na gelijk aan de drainagesituatie;
- De tweede term heeft betrekking op de stroming boven drainniveau, maar wel beneden het niveau van de maximale uitholling;
- De derde term heeft betrekking op de stroming boven het niveau van de maximale uitholling. Vooralnog is de dikte conform de klassieke variant, dus de helft van de maximale dikte. In de vergelijking met de numerieke simulatie zal hier nader op worden ingegaan.

De vergelijking is een bijzondere vorm van vergelijking 106 uit de publicatie van Hooghoudt uit 1940, die hieronder is weergegeven (waarbij s is q_i , n is h_p , m_0 is $(h_p - m_u)$ en k_1 is k_2):



Figuur 25

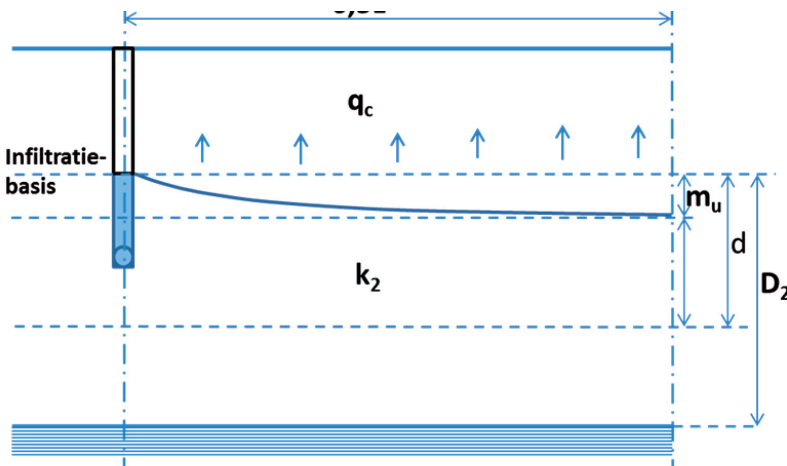
Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van greppels (slooten, enz.) gefiltreerd wordt, de gemiddelde doorlatendheid van den grond boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels (slooten, enz.) k_2 en onder genoemd vlak, tot een zekere diepte daaronder, k_1 is. De streaming in de capillaire laag mag verwaarloosd worden

$$s = \frac{8k_1 dm_0 - 4k_1 m_0^2}{l^2} \quad (108)$$

Afbeelding 4: Vergelijking 106 uit Hooghoudt (1940) inclusief toelichting.

Dus in het geval dat er geen noemenswaardig verschil in doorlatendheid is van de grond boven of onder drainniveau, en de dikte van de equivalentlaag wordt genomen zoals is aangegeven in afbeelding 5, gaat vergelijking (6) over in (inhoudelijk identiek aan vergelijking 108 van Hooghoudt):

$$q_i = \frac{8k_2 dm_u - 4k_2 m_u^2}{L^2}; \quad (7)$$



Afbeelding 5: Schematische voorstelling vergelijking (7).

Merk op dat vergelijking (7) ook toepasbaar is voor situaties waarin de uitholling groter is dan de peilopzet.

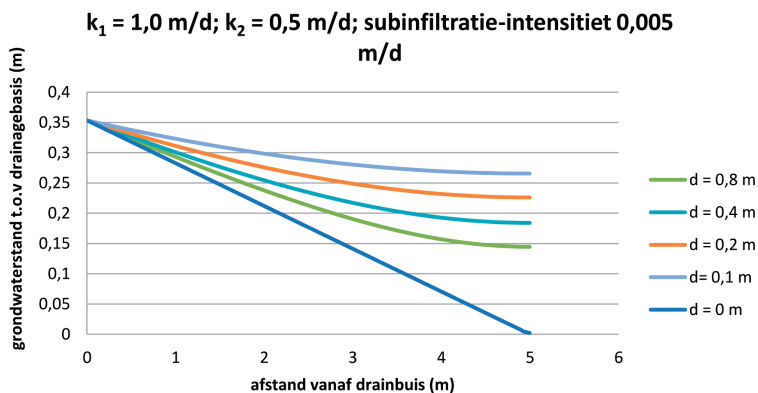
Vergelijking (7) is dus goed toepasbaar voor infiltratie vanuit sloten en drains in zandgronden waar het proces van rijping of veenafbraak niet zorgt voor grote verschillen in doorlatendheid boven en onder het niveau van de slootbodem of drain.

Vergelijking met numerieke simulaties

Met een spreadsheetprogramma zijn de vergelijkingen (1) en (4) numeriek nagerekend, door in een dwarsdoorsnede van 5 m (halve drainafstand) per gediscrèteerd element de Wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking te combineren, met inachtneming van de Dupuit-aanname (geen gradiënt in de z-richting). Dit leverde voor de drainagevergelijking nagenoeg de theoretische waarden voor de gemiddelde dikte van de doorstroomde laag boven drainniveau ($0,5 m_o$). De vormfactor varieerde van ongeveer 0,85 voor alleen stroming boven drainniveau tot 0,70 voor alleen stroming beneden drainniveau en een waarde voor d van 2 m (waarden enigszins afhankelijk van de opgelegde infiltratie-intensiteit). Een dikte van 2 m is ongeveer de maximale waarde bij een drainafstand van 10 m.

Voor de subinfiltratiesituatie leverde de vergelijking de volgende vermeldenswaardige resultaten:

- De theoretisch afgeleide vergelijking wordt bij numerieke rekenexercities vrijwel eenduidig gereproduceerd. De afwijkingen zijn het gevolg van de gekozen ruimtelijke discretisatie en het iteratieschema;
- Als de uitholling bij benadering gelijk wordt aan de peilopzet en als tevens stroming uitsluitend boven drainniveau plaatsvindt, dan wordt een recht verloop van de grondwaterstand berekend, zie afbeelding 5. De vormfactor daarbij is 0,5. Dit is ook theoretisch verklaarbaar: de afname van het doorstroomd debiet met toenemende afstand tot drain of sloot is recht evenredig met de afname van de dikte van het doorstroomd pakket. Op afstand $0,5L$ moet de gradiënt in de grondwaterstand echter nul zijn. In het limietgeval (uitholling exact gelijk aan peilopzet) ontstaat instabiliteit;
- Als de uitholling relatief gering is ten opzichte van de peilopzet is de vormfactor groter dan 0,5 (maximaal 0,95; omdat de equivalentlaag niet oneindig dik kan worden). Afbeelding 6 maakt een en ander inzichtelijk. De gekozen peilopzet is iteratief tot op $1/1000$ m nauwkeurig bepaald, om het rechte verloop van de grondwaterstand bij $d = 0$ m over vrijwel de gehele dwarsdoorsnede te realiseren.



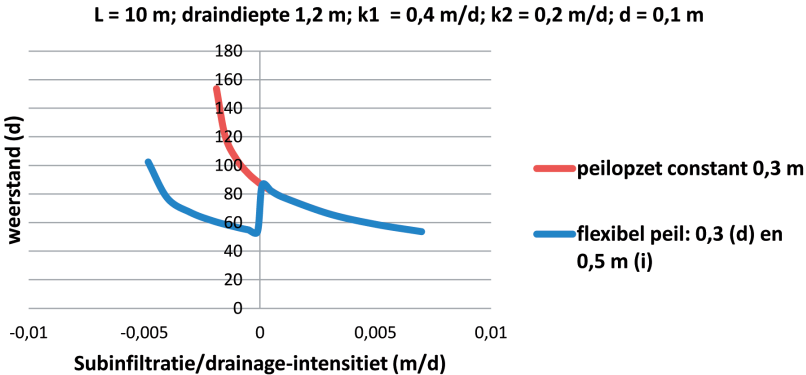
Afbeelding 6: Het grondwaterstandverloop bij een specifieke peilopzet en een subinfiltratie-intensiteit van $0,005 \text{ m/d}$, bij verschillende diktes van de equivalentlaag.

Ook is de subinfiltratieweerstand te definiëren als het quotiënt van uitholling en subinfiltratie-intensiteit. Deze is wederom niet constant maar is, bij een gegeven dikte en doorlatendheid van de pakketten boven en onder drainniveau, een functie van de subinfiltratie-intensiteit.

Voor een situatie met de volgende kenmerken:

- Peilgestuurde drainage met voornamelijk stroming boven drainniveau;
- Een drainafstand van 10 m en een draindiepte van 1,20 m;
- Een constante peilopzet van 0,3 m;

wordt bij een drainage-intensiteit van 0,007 m/d de doorlatendheid zodanig aangepast dat een opbolling wordt berekend van 0,4 m (zodat wordt voldaan aan het stationair drainagecriterium voor bouwland). De daarbij numeriek berekende relatie tussen drainage/infiltratie-intensiteit en drainage/subinfiltratieweerstand is weergegeven in afbeelding 6.



Afbeelding 6: Voorbeeld van een relatie tussen drainage/infiltratie-intensiteit en bijbehorende weerstand, bij 2 vormen van peilgestuurde drainage: constante peilopzet van 0,3 m en een flexibel peilbeheer waarbij of 0,3 m peilverlaging (drainage) of 0,5 m peilverhoging (infiltratie) t.o.v. de drainagebasis plaatsvindt.

Merk op dat de weerstand voor subinfiltratie snel oploopt met toenemend subinfiltratiedebiet. Bij een intensiteit van minder dan 0,002 m/d is de uitholling meer dan de peilopzet van 0,3 m. In dergelijke situaties kan gebruik van drainbuizen voor subinfiltratie dus problematisch zijn. Om de subinfiltratie te verhogen is een hogere peilopzet van 0,5 m (in plaats van 0,3 m) effectief (zie afbeelding 7). Daarbij is een infiltratie mogelijk van 0,004 m/d bij een toegestane uitholling van 0,3 m: ruim een verdubbeling dus.

De toepassing van de in deze sectie beschreven kennis komt hierna aan de orde.

Praktijktoepassingen

Polder Noordplas

Een fraaie toepassing van de klassieke Hooghoudt-vergelijking is beschreven in een artikel over polder De Noordplas (Van Bakel e.a., 2013). Daarbij is de vergelijking gebruikt om de verkleining van de drainafstand te bepalen die nodig is om een peilverhoging en daarmee gepaard gaande ondiepere ligging van de drains te compenseren. Ook is de vergelijking gebruikt bij niet-stationaire berekeningen met SWAP. Als zou zijn gerekend met constante weerstand (gelijk aan de weerstand bij afvoer van 0,007 m/d), is de weerstand, bij de gemiddelde drainafvoer in het winterhalfjaar van 0,002 m/d, bijna een factor 2 hoger (zie afbeelding 2). Derhalve wordt de grondwaterstand bij niet

toepassen van Hooghoudt in de winter structureel te laag berekend en wordt, aangezien de natschade niet-lineair afhankelijk is van de grondwaterstand, de benodigde verkleining van de drainafstand onderschat.

Marwijksoord

Op de proefboerderij Marwijksoord, nabij Rolde (in Drenthe), is een proeflocatie voor Klimaatadaptieve Drainage ingericht waarbij in de zomer wordt gesubinfiltréerd. De drains liggen in of op een slecht doorlatende laag (keileem). Bij uitstek is Hooghoudt hierop dan van toepassing. De benodigde infiltratie-intensiteit is gelijk aan de capillaire opstijging van (geschat) maximaal 0,003 m/d plus de wegzijging ten tijde van subinfiltratie (die op 0,002 m/d is gesteld), oftewel 0,005 m/d. De peilopzet is ongeveer 0,3 m. Uit de eis dat de uitholling maximaal 0,2 m mag zijn (in verband met ruimtelijk zo homogeen mogelijke capillaire opstijging) en een geschatte doorlatendheid van 0,5 m/d boven drainniveau, volgt een drainafstand van afgerond 4 m; bij een doorlatendheid van 1,0 m/d hoort een drainafstand van 6 m. Bij de aanleg van de proef is een drainafstand van 6 m aangehouden.

Discussie

Het niet constant zijn van de drainage- en subinfiltratieweerstand speelt vooral bij klei- en veengronden. Bij veengronden vanwege grotere doorlatendheden boven drainniveau, als gevolg van rijping of veenaafbraak, en bij keileemgronden omdat de bovenkant van de keileemlaag de facto de hydrologische basis vormt. Het grootste areaal gedraineerde gronden in Nederland komt voor op kleigronden en gronden met keileem ondiep in het profiel, en het areaal gedraineerde veengronden kan door de populariteit van onderwaterdrainage snel stijgen. Het moet daarom een serieus aandachtspunt zijn bij regionale modellering in dit type gebieden.

Een drain is geen perfecte drain. Dit betekent dat de uittreeweerstand niet gelijk is aan nul en dat de peilopzet waar mee moet worden gerekend kleiner is dan de waterstand in de drain (of sloot). De kennis hierover is beperkt en bovendien sterk afhankelijk van meerdere variabelen: de wijze van draineren, de omstandigheden tijdens de aanleg en het gepleegde onderhoud.

De capillaire opstijging (plus kwel) is in de beschreven beschouwingen niet afhankelijk gesteld van de grondwaterstand terwijl bekend is dat die een functie is van de grondwaterstandsdiepte. Er zijn relaties af te leiden die deze afhankelijkheid wel in beeld brengen, maar dan zijn geen analytische formules meer toepasbaar. Bovendien is deze relatie in hoge mate niet-eenduidig. Hiermee rekening houden is duidelijk 'een brug te ver'.

Drainageformules worden vaak toegepast in niet-stationaire situaties. Vooral situaties met variërende peilopzetten zijn conceptueel nogal afwijkend van de situatie waarvoor Hooghoudt is afgeleid. Het effect van de peilopzet op de grondwaterstand is daarbij een functie van tijd en de afstand tot de drain. Nadere analyse is gewenst, maar voor situaties met een kleine drainafstand is de inschatting dat de versimpeling aanvaardbaar is.

De relatie grondwater-oppervlaktewater in regionale modellen is, zoals reeds in de inleiding opgemerkt, per ontwateringsmiddel veelal geconceptualiseerd als een eenduidige relatie tussen drainage-intensiteit en verschil tussen grondwaterstand en oppervlaktewaterstand, waarbij de evenredigheidsconstante (reciproke: drainage-weerstand) eenduidig is maar ook constant gesteld (onafhankelijk van de grondwaterstand). Zoals in dit artikel aangetoond kan dat leiden tot sterk van de werkelijkheid afwijkende resultaten. Een betere relatie in de vorm van de Hooghoudt-vergelijking is voorhanden en er is geen enkele reden deze niet te gebruiken. Een goed numeriek model kan prima omgaan met drainageweerstand die afhankelijk zijn van de gesimuleerde grondwaterstand.

Conclusies

De vergelijking van Hooghoudt voor de beschrijving van de grondwaterstroming naar sloten en drains is de meest gebruikte methode om drainage te ontwerpen. De vergelijking is ook toepasbaar om de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater te parameteriseren, in de vorm van een drainageweerstand die afhangt van de grondwaterstand. De vergelijking van Hooghoudt wordt echter weinig in regionale modellen toegepast en dat kan, vooral bij buisgedraineerde situaties, tot behoorlijke fouten leiden. De aanbeveling is daarom 'Hooghoudt' vanaf nu in het licht van good modelling practice wel toe te passen want er is geen enkele rekentechnische reden dit niet te doen.

De vergelijking is ook toepasbaar voor subinfiltratie. Daartoe is een aangepaste formule gepresenteerd die is vergeleken met een numerieke simulatie. De numerieke resultaten zijn gebruikt om waarden voor de vormfactor af te leiden, die aanzienlijk kan variëren.

De praktische toepassingen laten zien dat 'Hooghoudt' een revival in het waterbeheer verdient en de betekenis van zijn werk in een tijdvak van scenariostudies nog lang niet is 'uitgehouden'.

Referenties

- Ernst, L.F.** (1962) Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige leidingen. Versl. Landb. Onderzoek no. 67 (14)
- Hooghoudt, S.B.** (1940) Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van de grond. Versl. Landb. Onderzoek no. 46 (14) B
- Ritzema, H.P.** (Editor-in-Chief) (2006) Drainage Principles and Applications. ILRI-publication 16 (third edition)
- Bakel, P.J.T. van, J. Schaap en E.A. van Essen** (2013) Is peilverhoging in een kleipolder agrohydrologisch neutraal te realiseren? In: Stromingen 1(19)
- Van Beers, W.F.J.** (1976) Computing Drain Spacings. ILRI-publicatie 15