
Bepaling van freatische lekweerstand in het NHI fase 1+

A.J.J. Vergroesen¹, W.J. de Lange¹, A.A. Veldhuizen²

P.J.T. van Bakel² en M.J.H. Pastoors³

Samenvatting

Dit artikel beschrijft een methode om op basis van GIS-bestanden de drainage relaties tussen het grondwater en de aanwezige oppervlaktewaterstelsels te berekenen voor vierkante elementen (bijvoorbeeld MODFLOW cellen). De methode, die in NHI-Fase 1 is gehanteerd, is in Fase 1+ verbeterd. Dit artikel geeft ook aan dat de methode in NHI-fase1+ op onderdelen nog onvoldoende is. Dat zal verbeterd worden in fase 2 van het NHI-project. In de hier beschreven methode worden lijnvormige drainage stelsels omgezet naar representatieve parameters per vierkant. Het deel van het grondwater systeem waarin deze drainagestelsels werken, wordt in modelleer termen vaak het topsysteem genoemd. Wij richten ons hierbij op de omrekening van de effecten van de drie belangrijkste drainagestelsels (primaire, secundaire en tertiaire). In Figuur 1 is de werkwijze schematisch weergegeven.

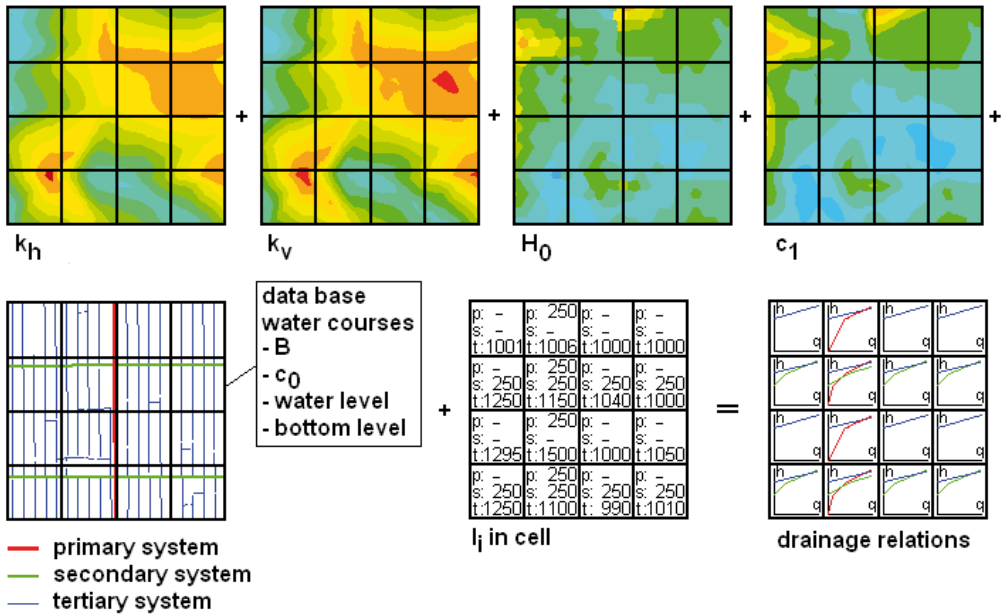
Figuur 1 geeft verdelingen van de verschillende parameters weer, te weten de horizontale en verticale doorlatendheden (k_h , k_v), de dikte van het topsysteem (H_0), de weerstand van het topsysteem (c_1) en de eigenschappen van de waterlopen (slootdichtheid, bodemontrek, bodemweerstand). Op basis van deze verdelingen worden per cel de parameters afgeleid voor de relatie tussen grondwaterstand en afvoer per vierkant (cel). Bij meervoudige drainagestelsels zijn dat niet-lineaire relaties. De in NHI gebruikte relaties zijn gebaseerd op de theorie voor de freatische lekweerstand, de zogeheten consensus methode (Van Bakel et al, 2002).

Dit artikel gaat dus in op de wijze van bepaling van de parameters voor de interactie tussen oppervlakte water en grondwater in de praktijk van het NHI. We plaatsen kanttekeningen bij de ontwikkelde methode en geven aan wat in fase 2 te verwachten is.

1 Deltares. Correspondentie: toine.vergroesen@deltares.nl

2 Alterra

3 Planbureau voor de Leefomgeving



figuur 1: Schematisch overzicht van de generieke methode.

Inleiding

In NHI fase 1+, die in 2008 is afgerond, zijn verbeteringen ingevoerd ten opzichte van de in voorgaande fase gehanteerde methode. De parameterisering van de relatie voor samenwerkende stelsels bevat nu een terugkoppeling op het moment dat wordt geschakeld naar meer of minder werkende drainage systemen..Hierop komen we later in dit verhaal terug.

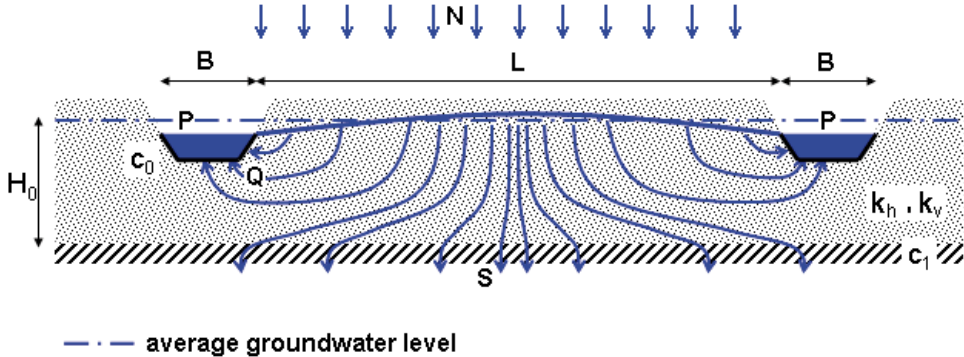
In NHI wordt per cel gewerkt met de zogeheten weerstand-peil relatie (RIV package), waarin de effecten van de individuele sloten, beken etc., worden uitgesmeerd over het gehele cel-oppervlak. In plaats van de gebruikelijke MODFLOW benadering waarin de interactie van alle lijnvormige oppervlakte wateren met het grondwater worden vertaald als “RIVER” op de cel knoop, berekent de NHI methode de ruimtelijk samenhangende interactie. Voor verdere uitleg hiervan verwijzen wij naar de artikelen in Stromingen hierover in de literatuurlijst. De samenhangende interactie wordt uiteindelijk uitgedrukt in een weerstand-peil relatie op de cel knoop, waarbij de weerstand de Freatische Lekweerstand is genoemd. (Wellicht ten overvloede herhalen we nogmaals dat deze niet gelijk is aan de drainage weerstand zoals die in veld situaties wordt bepaald). Dus, in plaats van de omrekening volgens de MODFLOW methode – die puur oppervlakte evenredig is – vult NHI de Freatische Lekweerstand in per cel geldend over het gehele oppervlak van de cel.

Binnen het NHI worden maximaal vijf drainagestelsels (ontwateringsniveau's) onderscheiden. Twee van deze vijf stelsels (buisdrainage en maaivelddrainage) worden afzonderlijk in het model opgenomen. In onderstaande beschrijving van de gehanteerde

formules zijn daarom alleen die gevallen onderscheiden met één, twee of drie drainage stelsels. Natuurlijk bedoelen we hier met drainage stelsels, de sloten, greppels, beken, kanalen vaarten en alle andere systemen die nabij maaiveld voor aan- en/of afvoer van grondwater (kunnen) zorgen.

BEREKENING VAN DE FREATISCHE LEKWEERSTAND

Bij de bepaling van de freatische lekweerstand is uitgegaan van de formule van De Lange (1997a,b,c). Daarbij wordt de formule voor het gebied tussen de sloten gehanteerd, aangevuld met een correctie voor het traject onder de slootbodem.



figuur 2: Drainage van grondwater naar een enkelvoudig drainagestelsel

De formules van De Lange (zie Groenendijk et al, 2002) luiden:

$$c_{f-lek} = \frac{c_L^* \cdot \left(c_0 + c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot (B_{cor} + L_{tot})}{B_{cor} \cdot c_L^* + L_{tot} \cdot \left(c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right)} + \frac{L_{tot}}{\pi \sqrt{k_{0,x} \cdot k_v}} \cdot \ln \left(\frac{4H_0}{\pi B_{cor}} \right) - \left(c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \quad (1)$$

Waarin:

$$c_L^* = \left(c_0 + c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot F_L + \left(c_0 \cdot \frac{L_{tot}}{B_{cor}} \right) \cdot F_B \quad (2)$$

En:

$$F_L = \frac{L_{tot}}{2\lambda_L} \cdot \operatorname{ctnh} \left(\frac{L_{tot}}{2\lambda_L} \right) \quad (3) \quad \text{met} \quad \lambda_L = \sqrt{\left(c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot k_{0,x} \cdot H_0} \quad (4)$$

$$F_B = \frac{B_{cor}}{2\lambda_B} \cdot \operatorname{ctnh} \left(\frac{B_{cor}}{2\lambda_B} \right) \quad (5) \quad \text{met:} \quad \lambda_B = \sqrt{\frac{k_{0,x} \cdot H_0 \cdot \left(c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot c_0}{c_1 + \frac{H_0}{k_v} + c_0}} \quad (6)$$

Hierin¹ is:

- $c_{f,lek}$ freatische lekweerstand van het drainagestelsel [d]
- c_L^* voedingsweerstand voor het landoppervlak deel van de doorsnede [d]
- c_0 weerstand van de slootbodembodem [d]
- c_1 weerstand van de scheidende laag (onder het topsysteem) [d]
- H_0 representatieve dikte van het watervoerend pakket in het topsysteem [m]
- k_v verticale doorlatendheid van het watervoerend pakket in het topsysteem [m/d]
- $k_{0,x}$ horizontale doorlatendheid van het watervoerend pakket in het topsysteem [m/d]
- L_{tot} representatieve slootafstand [m] (afstand tussen de slootkanten)
- B_{cor} breedte van de sloten [m] (gecorrigeerd bij extreem kleine waarden)
- λ_L spreidingslengte behorend bij $0 \leq x \leq L/2$ [m]
- λ_B spreidingslengte behorend bij $-B_{cor}/2 \leq x \leq 0$ [m]

De tweede term in de rechterzijde is een toevoeging voor de radiale weerstand naar voorbeeld van Ernst (1961). De freatische lekweerstand is gelijk aan de voedingsweerstand minus de verticale weerstand (de laatste term in (1)).

Het achterliggend concept omvat dat percolerend neerslagwater, dat de bovenzijde de grondwaterspiegel bereikt, kan afstromen naar een drainagestelsel of kan infiltreren naar het onderliggende watervoerend pakket. Water dat naar het drainagestelsel stroomt, moet de freatische lekweerstand overwinnen. Water dat naar het onderliggende pakket stroomt, moet de weerstand tegen verticale stroming in de toplaag overwinnen.

Uit de nadere analyse van de formule binnen NHI fase 1+ zijn enige interessante conclusies gekomen, die hieronder zijn weergegeven.

De freatische lekweerstand blijkt in het geval van een holocene deklaag nagenoeg ongevoelig voor de verticale weerstand onder de drainerende laag (c_1), en voor de dikte van de drainerende laag (H_0). Deze laatste wordt pas relevant als de drainerende laag dunner dan 2 meter wordt. Ook in een pleistoceen zandgebied blijkt de freatische lekweerstand nagenoeg ongevoelig voor de verticale weerstand onder de drainerende laag (c_1), en slechts licht gevoelig voor de dikte van de drainerende laag (H_0).

De volgende kanttekening is te maken ten aanzien van de bodemweerstand van de sloot. Bij drainerende sloten, die regelmatig geschoond worden is een waarde van 1 dag of minder niet ondenkbaar. Naarmate er meer bagger op de slootbodembodem ligt, zal de bodemweerstand toenemen. Bij continu infiltrerende sloten zal de bodemweerstand na verloop van tijd kunnen oplopen door fysische en / of chemische dichtslibbing van de slootbodembodem. Ook in zandgebieden dient daar rekening mee worden gehouden. In die situatie leidt een hogere bodemweerstand voor een verder identiek stelsel automatisch tot een hogere weerstand tegen infiltratie, dan tegen drainage. Hoewel deze kennis reeds lang bestaat, is dit om redenen van eenvoud en schaal van werken nog niet in NHI 1+ en haar voorgangers geïmplementeerd.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de doorlatendheid van de deklaag (dominant in holocene gebieden) en de bodemweerstand van de sloot (dominant in pleistocene

gebieden) de belangrijkste onbekenden zijn bij de bepaling van de freatische lekweerstand. De slootafstand en de slootbreedte zijn op zich sterk bepalend voor de waarde van de freatische lekweerstand, maar deze zijn veel beter vast te stellen. De weerstand van de scheidende laag onder het topsysteem is – zoals te verwachten was – nauwelijks of niet van invloed op de grootte van de freatische lekweerstand.

Bepaling parameters in de freatische lekweerstand

Voor het afleiden van de parameters om de freatische lekweerstand te berekenen, zoals H_0 , k_v en $k_{0,x}$, is gebruik gemaakt van beschikbare kaarten, zoals hydrotype-kaart, kD-kaart en diktekaart (Massop et al, in prep.). De diktekaart van de deklaag is voor een aantal gebieden aangepast. Voor het lage deel van Nederland is in de kleigebieden de dikte van de relevante toplaag beperkt tot 2 m en voor veengebieden tot 1 m. Verder is een minimale dikte gehanteerd van 1 m. Voor hoog Nederland is alleen voor West-Brabant (Kedichem-Tegelen profiel) een maximale dikte van 5 m gehanteerd, voor de overige gebieden is de dikte overgenomen. Om een k_v -waarde toe te kennen is per hydrotype een keuze gemaakt in klei, veen, grof zand (stuwwallen) en fijn zand (overig Pleistoceen en Duinen). Aan deze vlakken is op basis van een k -waarde tabel een k_v -waarde toegekend. De c -waarde is niet aangepast.

De bepaling van de slootbreedte is gebaseerd op twee bronnen. Als basis is Massop et al (2007) gebruikt, waarin voor de combinatie hydrotype en top-10 vectorklasse een inschatting is gemaakt van de slootdimensies. Voor de hoofdwaterlopen in het vrij afwaterende deel van Nederland zijn deze gegevens vervangen door de waterlooptdimensies die zijn bepaald ten behoeve van MOZART. De intreeweerstanden zijn overgenomen uit Alterra-rapport 1339 (Van der Gaast et al, 2006). Hierin is een kennistabel opgesteld met een relatie tussen de intreeweerstand en de bodemfysische eenheid.

Omdat sloten in Nederland in het algemeen niet parallel en op gelijke afstand lopen zal de representatieve slootafstand binnen een willekeurig vierkant oppervlak (cel van 250 x 250 m) niet direct kunnen worden bepaald. Voor willekeurig gelegen sloten bestaat een eenvoudige rekenregel om de representatieve slootafstand geschikt te maken voor gebruik in de berekening van de freatische lekweerstand (De Lange, 1996):

$$L = A/\Sigma l_i \quad (7)$$

Waarin:

- L Representatieve slootafstand [m]
- A Beschouwde oppervlakte [m²]
- Σl_i Sommatie van lengtes van individuele sloten [m]

Voor de bepaling van de slootafstand voor cellen van 250 bij 250 meter is binnen NHI fase 1+ gekeken of die mag worden berekend enkel op basis van de slootdichtheid binnen de cel. Hiervoor zijn drie gevallen onderscheiden:

1. Slootafstand is kleiner dan celbreedte ($\Sigma l_i > \sqrt{A}$);
2. Slootafstand is groter en slootlengte is groter of gelijk aan celbreedte ($\Sigma l_i \geq \sqrt{A}$);
3. Slootafstand is groter en slootlengte is kleiner dan celbreedte ($\Sigma l_i < \sqrt{A}$).

Binnen fase 1+ is dit nader geanalyseerd op basis van de analyse in De Lange (1991), dat wil zeggen hoe in deze drie gevallen de slootafstand moet worden bepaald. Behoudens in enkele gevallen kan worden volstaan met het berekenen van de slootafstand op basis van de gegevens binnen de cel zelf. In NHI-project fase 2 zullen we de uitzonderingsgevallen nader gaan beschouwen op hun voorkomen in de praktijk. In die situaties waar relevant andere representatieve slootafstanden moeten worden gehanteerd zal dan ook bekeken worden hoe dit in NHI kan worden geïmplementeerd.

Freatische lekweerstand voor meevoudige systemen

In nader onderzoek in NHI fase 1+ hebben we vastgesteld dat bij het bijschakelen van een tweede drainage systeem, er een terugkoppelings mechanisme in de waarde van de Freatische Lekweerstand optreedt, die in sommige gevallen zeer relevant kan zijn. In de bepaling van deze terugkoppeling hanteren we de volgende uitgangspunten, die ten dele op praktische uitvoerbaarheid zijn gebaseerd:

- de freatische lekweerstanden zijn onafhankelijk van de drainageniveaus en van de intensiteit van de grondwateraanvulling;
- de freatische lekweerstanden van de afzonderlijke drainagestelsels verhouden zich omgekeerd evenredig met de intrekgebieden van deze drainagestelsels;
- er wordt bij secundaire en tertiaire stelsels geen rekening mee gehouden dat deze stelsels al beginnen te draineren voordat de gemiddelde grondwaterstand het drainageniveau van deze stelsels bereikt.

In het geval twee drainage stelsels werkzaam zijn in het model, worden voor de bepaling van de totale Freatische Lekweerstand de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaal voor beide stelsels afzonderlijk de freatische lekweerstand met de formules 1 t/m 4. Ga er daarbij steeds vanuit dat het andere stelsel niet aanwezig is. Deze weerstanden noemen we W_{solo_p} voor het primaire stelsel en W_{solo_s} voor het secundaire stelsel.
2. Bepaal op basis van de freatische lekweerstanden die gevonden zijn bij stap 1 de intrekgebieden van beide stelsels. Voorlopig nog volgens:

$$I_p = \frac{W_{solo_s}}{W_{solo_p} + W_{solo_s}} \cdot I_{tot} \quad (8)$$

$$I_s = \frac{W_{solo_p}}{W_{solo_p} + W_{solo_s}} \cdot I_{tot} \quad (9)$$

3. Bepaal de representatieve slootafstand van het samenwerkende stelsel (L_{tot}). Dit is de gemiddelde afstand tussen de slootranden, in de veronderstelling dat alle sloten parallel en even ver uit elkaar liggen.
4. Bepaal voor L_{tot} de freatische lekweerstand van het primaire stelsel met de formules 1 t/m 6. Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de primaire sloten. Deze weerstand noemen we W_{tot_p} .

5. Bepaal voor L_{tot} de freatische lekweerstand van het secundaire stelsel met de formules 1 t/m 6. Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de secundaire sloten. Deze weerstand noemen we W_{tot_S} .
6. Bepaal voor het samenwerkende drainagestelsel de freatische lekweerstanden van het primaire deel en van het secundaire deel. De freatische lekweerstand van het totale stelsel volgt daar weer uit:
- 7.

$$W_P = \frac{I_P \cdot W_{tot_P} + I_S \cdot W_{tot_S}}{I_P} \quad (10)$$

$$W_S = \frac{I_P \cdot W_{tot_P} + I_S \cdot W_{tot_S}}{I_S} \quad (11)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_P} + \frac{1}{W_S}} \quad (12)$$

In bovenstaande formules (8 t/m 12) is:

| | |
|---------------|---|
| W_{solo_P} | freatische lekweerstand [d] als alleen het primaire slotenstelsel aanwezig is |
| W_{solo_S} | freatische lekweerstand [d] als alleen het secundaire slotenstelsel aanwezig is |
| I_{tot} | totale intrekgebied (de celbreedte) [m] |
| I_P | intrekgebied van het primaire deel van het slotenstelsel [m], rekening houdend met de aanwezigheid van het secundaire stelsel |
| I_S | intrekgebied van het secundaire deel van het slotenstelsel [m], rekening houdend met de aanwezigheid van het primaire stelsel |
| W_{tot_P} | freatische lekweerstand [d] als alle sloten van het slotenstelsel primaire sloten zouden zijn |
| W_{tot_S} | freatische lekweerstand [d] als alle sloten van het slotenstelsel secundaire sloten zouden zijn |
| W_P | freatische lekweerstand van het primaire deel van het slotenstelsel [d] |
| W_S | freatische lekweerstand van het secundaire deel van het slotenstelsel [d] |
| W | freatische lekweerstand van het totale slotenstelsel [d] |

Als er drie drainage stelsels werkzaam zijn wordt een vergelijkbare werkwijze gevolgd als voor de hierboven beschreven bijschakeling van het secundaire stelsel. Daarbij wordt de werking van de primaire en secundaire slotenstelsels gecombineerd tot een enkel slotenstelsel. Vervolgens wordt het tertiaire slotenstelsel bijgeschakeld. De complete formules zijn te vinden in het NHI rapport over de bepaling van de freatische lekweerstanden (De Lange et al, 2008).

Implementatie in modflow

Binnen het NHI wordt gewerkt met het grondwaterpakket MODFLOW, waarbij gebruik wordt gemaakt van vierkante cellen van 250 x 250 m. Voor de uitwisseling tussen grondwater en oppervlaktewater wordt gebruik gemaakt van 3 MODFLOW packages:

- RIV: river package voor afvoer en aanvoer via waterlopen;
- DRN: drainage package voor afvoer via (buis)drainage;
- SOF: saturated overland flow package voor afvoer over maaiveld.

De drainagestelsels die we hier beschrijven met een freatische lekweerstand en een peil beperken zich tot de waterlopen en maken dus gebruik van de RIV package. De Freatische Lekweerstand geldt over de complete MODFLOW cel. Daarom wordt de in MODFLOW gehanteerde conductance bepaald met de formule:

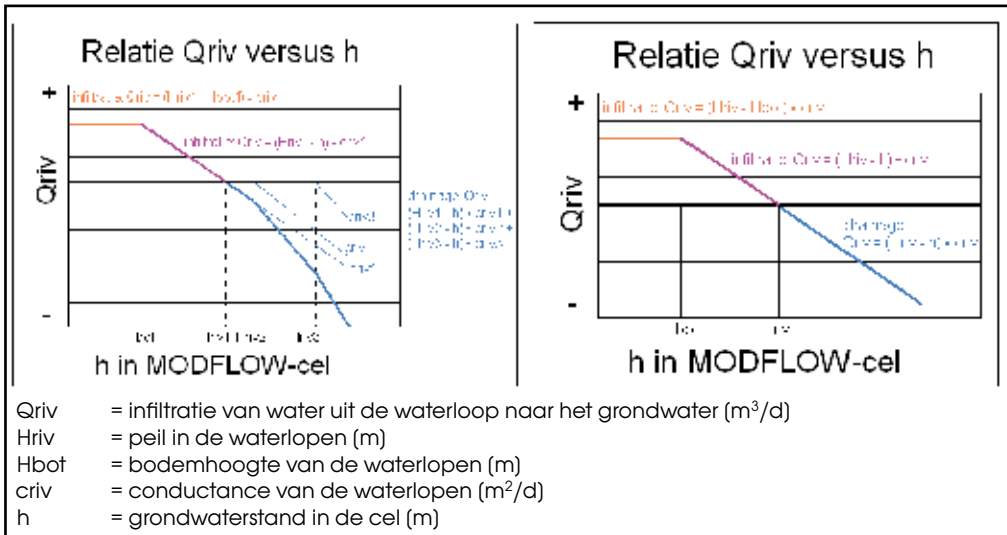
$$c_{riv} = A / c_{f-lek} \tag{13}$$

Waarin:

A Oppervlak van de cel [m²]

c_{f-lek} Freatische lekweerstand [d]

Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van de Q_{riv}-h-relatie van het MODFLOW river package. Het linkerdeel van deze figuur laat dit zien voor een enkelvoudig stelsel, het rechterdeel voor een meervoudig stelsel. Wanneer bij een enkelvoudig stelsel de gemiddelde grondwaterstand h hoger is dan het peil in de watergang, draineert deze watergang, en zal er afvoer plaatsvinden. Wanneer de grondwaterstand lager is dan het peil in de watergang zal de watergang infiltreren en zal er (uitgaande van gelijk blijvend oppervlaktewaterpeil) wateraanvoer plaatsvinden. Wanneer de grondwaterstand lager wordt dan de bodemhoogte van de watergang wordt in MODFLOW de infiltratieflex constant verondersteld.



figuur 3: Schematische weergave van de relatie tussen de flux van / naar drainagestelsels (Q_{riv}) en de grondwaterstand (h) in een MODFLOW-cel

Bij meerdere drainagestelsels werkt het wat gecompliceerder. Ieder stelsel (primair, secundair en tertiair) heeft zijn eigen freatische lekweerstand. Zodoende ontstaat er een

meervoudige relatie in een cel. Figuur 3 (rechterdeel) geeft daarvan een voorbeeld voor drie drainagesstelsels. De primaire waterloop in deze cel kan infiltreren en draineren. De secundaire en tertiaire waterlopen kunnen alleen draineren als de grondwaterstand respectievelijk boven Hriv2 dan wel Hriv3 komt. Er is in het model geen wateraanvoer naar deze watergangen mogelijk, en dus is er ook geen infiltratie uit deze watergangen mogelijk. De Q-h-relatie van het totale stelsel is weergegeven door de dikke lijn, de Q-h-relaties van de afzonderlijke stelsels door de dunne lijnen. daarbij is uitgegaan van onafhankelijk werkende stelsels.

De werkelijkheid is gecompliceerder, omdat de stelsels elkaar beïnvloeden. Zodra een stelsel bijschakelt, gaan de tot dat niveau al werkende stelsel relatief minder water leveren. Ook het bijgeschakelde stelsel levert minder dan het zou doen als de andere stelsels afwezig waren. In fase 1+ is hier in zoverre rekening mee gehouden dat in de Q-h-relatie van het secundaire stelsel de samenwerking van dit stelsel met het primaire stelsel is verwerkt. Op dezelfde manier is in de Q-h-relatie van het tertiaire stelsel is de samenwerking van dit stelsel met het primaire en het secundaire stelsel verwerkt. Dat levert één geknikte Q-h-relatie op voor de drie gezamenlijke stelsels.

Nadeel van deze keuze is dat bij werking van meerdere stelsels het hoogste stelsel (het primaire stelsel) in het model relatief te weinig, en het laagste stelsel (het secundaire dan wel het tertiaire stelsel) relatief te veel water zal aantrekken. Hoe dit voor de secundaire stelsels uitpakt als het tertiaire stelsel in werking treedt, is op voorhand niet eenduidig te stellen. Dat hangt af van de onderlinge verhouding tussen de drie stelsels. Een principe oplossing voor dit probleem is al uitgewerkt. In fase 2 zal deze oplossing worden getoetst en in het NHI worden geïmplementeerd.

Referenties

- Ernst, L.F., (1961)** *Grondwaterstromingen in de verzadigde stroming en hun berekening bij de aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen*, Verslag Landbouwkundig onderzoek, 67.15, Pudoc, Wageningen
- De Lange, W.J., (1996)** *Groundwater modelling of large domains with analytic elements*, proefschrift, Delft University of Technology.
- De Lange, W.J., (1997)a** *Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 1: De basis van het modelconcept*, in: *Stromingen* 3(2)
- De Lange, W.J., (1997)b** *Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 2: Het gebruik van de randvoorwaarde*, in: *Stromingen* 3(3)
- De Lange, W.J., (1997)c** *Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 3: De parametrisering van de randvoorwaarde*, in: *Stromingen* 3(4)
- De Lange, W.J., (1998)** *On the errors involved with the parametrization of the MODFLOW river and drainage packages*, in *MODFLOW'98 Volume I*, ed. J. Poeter, Z. Zheng and M.Hill, 249-256

- De Lange, W.J., (1999)** *A Cauchy boundary condition for the lumped interaction between an arbitrary number of surface waters and a regional aquifer, Journal of Hydrology* 226 250-261
- De Lange, W.J., (2001)** *Wanneer geldt 'slootafstand = elementbreedte' in de berekening van de topsysteemweerstand voor grondwatermodellering? Stromingen* 7-3. p. 13-16.
- De Lange, W.J., A.J.J. Vergroesen, J. Snepvangers, R.M. Pastoors, P.J.T. van Bakel, H.Th.L Massop, (2008)** *NHI rapport no5: Bepaling van de Freatische Lekweertsanden, Deltares rapport, Utrecht.*
- Groenendijk, P, W.J. de Lange en K. Kovar, (2002)** *Modelconcepten voor de interactie tussen verzadigd grondwater en oppervlaktewater. Stromingen* 8-2. p. 11.28.
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill en M.G. McDonald, (2000)** *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process; U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pag.*
- Massop H.Th.L, J.W.J. van der Gaast & A.G.M. Hermans, (2007)** *Kenmerken van het ontwateringsstelsel in Nederland; Wageningen. Alterra-rapport 1397.*
- Massop H.Th.L, I.Peereboom, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors, P.J.T. van Bakel, J. Hoogewoud en T.Kroon, in prep. Relatie grondwater – oppervlaktewater. Landsdekkende parametrisatie van het topsysteem. Alterra-rapport 1398.**
- Van Bakel, P.J.T., W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors en P. Groenendijk, (2002)** *De parametrisatie van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater voor landelijke en regionale grondwatermodellering. Stromingen* 8-2. p.5-9.
- Van der Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon & I.G. Staritsky, (2006)** *Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Wageningen, Alterra-rapport 1339.*
- Vermulst J.A.P.H. en W.J. De lange, (1999)** *An analytical approach for coupling models for unsaturated and saturated groundwater at different scales, Journal of Hydrology, 226 243-250*

1 De in dit artikel gebruikte formules zijn beschikbaar in een EXCEL spreadsheet bij de eerste auteur