De anisotrope transmissiviteit van heterogene aquifers

Samenvatting
In dit artikel is aangetoond dat de welbekende Dupuit-benadering ter beschrijving van grondwaterstroming in perfect gelaagde aquifers, onder zekere condities gegeneraliseerd kan worden naar aquifers waarin horizontale heterogeniteiten in de doorlatendheden voorkomen. Voor horizontaal heterogene aquifers moet de bekende Dupuit-uitdrukking voor de relatie tussen doorlatendheid en transmissiviteit worden uitgebreid. Deze uitbreiding laat zien dat de transmissiviteit in het algemeen niet-symmetrisch is. Wegens het niet symmetrisch zijn van de gegeneraliseerde transmissiviteit bestaan er ook geen hoofdassen waarlangs de Dupuit-vergelijkingen in vereenvoudigde vorm kan worden uitgeschreven. Dit heeft gevolgen voor de toepasbaarheid van de gebruikelijke nummerieke modelcodes.
Er is ook een criterium afgeleid dat aangeeft wanneer een aquifer beschouwd mag worden als een gelaagde aquifer, waarvoor de gebruikelijke Dupuit-uitdrukking voor de transmissiviteit wel mag worden gebruikt als goede benadering.

1. Inleiding

In de geohydrologie is de zogenaamde Dupuit-benadering buitengewoon populair. De Dupuit-benadering dient ter beschrijving van grondwaterstroming in aquifers en ligt ten grondslag aan veel modelcodes voor geohydrologische modellering. Het grote voordeel van de Dupuit-benadering is dat er slechts twee ruimtelijke coördinaten in voorkomen, namelijk de twee horizontale coördinaten x en y.

DR. IR. W. ZIJL
TNO - Milieu en Energie
Instituut voor Grondwater
en Geo-energie

Dit in tegenstelling tot de algemeen geldende wet van Darcy, waarin alle drie de ruimtelijke coördinaten voorkomen, namelijk zowel de horizontale coördinaten x en y als ook de verticale coördinaat z.
In de Dupuit-benadering wordt het stromingsgedrag van de aquifer gekarakteriseerd door de transmissiviteit T of kD, terwijl in de wet van Darcy de doorlatendheid k voorkomt. Uiteraard kan de Dupuit-benadering worden afgeleid uit de continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy. Dit betekent ook dat de transmissiviteit T kan worden uitgedrukt in de, in het algemeen heterogene, doorlatendheidsverdeling k. Bij deze afleiding moet een aantal vereenvoudigingen worden aangenomen. Een bekende aanname is dat de dikte van de aquifer klein moet zijn ten opzichte van de schaal van de horizontale ruimtelijke variaties in de stijghoogte. Een andere nauwelijks bekende aanname betreft de mate van horizontale heterogeniteit van de doorlatendheidsverdeling k in de aquifer.
Het laatste aspect zal in dit artikel verder onder de loep worden genomen.
Hierbij zullen we onze aandacht vooral richten op de anisotropie van de transmissiviteit T, die ontstaat ten gevolge van de horizontale heterogeniteit in de doorlatendheidsverdeling k.
De Dupuit-benadering voor een freatische watervoerende laag boven een ondoorlatende basis ziet er, in haar meest algemene vorm, als volgt uit:

$Q_x = - T_{xx}\ \partial H/\partial x - T_{xy}\ \partial H/\partial y$

$Q_y = - T_{yx}\ \partial H/\partial x - T_{yy}\ \partial H/\partial y$

Hierin zijn x en y [m (meter)] de twee horizontale coördinaten; t [d (dag)] is de tijd; Q_x (x, y, t) [m³/(m.d)] is de volumestroom in de x-richting per lengte-eenheid in de y-richting; Q_y (x, y, t) [m³/(m.d)] is de volumestroom in de y-richting per lengte-eenheid in de x-richting; H (x, y, t) [m] is de hoogte van de grondwaterspiegel ten opzichte van een horizontaal referentievlak; T_{xx} (x, y) [m²/d] is de transmissiviteit in de x-richting ten gevolge van een verhang in de x-richting; T_{xy} (x, y) [m²/d] is de transmissiviteit in de x-richting ten gevolge van een verhang in de y-richting; T_{yx} (x, y) [m²/d] is de transmissiviteit in de y-richting ten gevolge van een verhang in de x-richting; en T_{yy} (x, y) [m²/d] is de transmissiviteit in de y-richting ten gevolge van een verhang in de y-richting.
Als de transmissiviteit niet van x en y afhangt noemen we de transmissiviteit homogeen; een niet-homogene transmissiviteit noemen we een heterogene transmissiviteit. Het is goed om er hier al op te wijzen dat uitspraken over de transmissiviteit, bijvoorbeeld de uitspraak: 'de transmissiviteit is homogeen', niet gelden voor de doorlatendheidsverdeling in de aquifer; een heterogene doorlatendheid kan heel goed resulteren in een homogene transmissiviteit.
Nu wordt er in het algemeen verondersteld dat de transmissiviteit symmetrisch is, dat wil zeggen dat $T_{xy} = T_{yx}$.
Deze aanname is zeer populair omdat er in dat geval een belangrijke vereenvoudiging van de Dupuit-vergelijkingen mogelijk is. Als de transmissiviteit symmetrisch is, bestaat er namelijk een zogenaamd hoofdassenstelsel met een x'-as en een y'-as waarvoor de Dupuit-benadering in de volgende welbekende vorm kan worden geschreven:

$Q_{x'} = - T_{x'x'}\ \partial H/\partial x'$

$Q_{y'} = - T_{y'y'}\ \partial H/\partial y'$

De populariteit van de bovengegeven vorm van de Dupuit-benadering op hoofdassen is ook te verklaren door het feit dat slechts de vorm op hoofdassen zich goed leent voor numerieke oplossingen met behulp van de meeste gebruikelijke modelcodes. Dit geldt zeker voor op de eindige-verschillen methode gebaseerde modelcodes als bijvoorbeeld Modflow en Flosa-fd, waarin de richting van de hoofdassen moet samenvallen met de twee oriëntatierichtingen van het gebruikte eindige-verschillenrooster.
Als ook nog geldt, dat $T_{x'x'} = T_{y'y'} = T$, dan noemen we de transmissiviteit isotroop. Voor een isotrope transmissiviteit geldt ook dat $T_{xx} = T_{yy} = T$ en dat $T_{xy} = T_{yx} = 0$. Een niet-isotrope transmissiviteit noemen we een anisotrope transmissiviteit.
Het is echter de vraag of de aanname van een symmetrische transmissiviteit ook te rechtvaardigen is van uit meer fundamentele uitgangspunten. In dit artikel zal worden aangetoond dat de transmissiviteit van een niet-perfect gelaagde aquifer, dat wil zeggen van een aquifer met horizontale heterogeniteit in de doorlatendheidsverdeling, anisotroop is. Dit is een bekend feit waarvan vaak gebruik wordt gemaakt bij het numeriek modelleren van grondwaterstroming. Bij onze afleiding van de anisotropie zal echter ook blijken dat de transmissiviteit in het algemeen niet-symmetrisch is. Als de transmissiviteit niet-symmetrisch is, bestaan er ook geen hoofdassen, dus is een schrijfwijze op hoofdassen niet meer mogelijk.
Dit heeft uiteraard gevolgen voor nummerieke modelstudies met de gebruikelijke modelcodes.

2. Uitgangspunten

Zoals gezegd kan de Dupuit-benadering met behulp van een aantal aannamen worden afgeleid uit de exacte basisvergelijkingen; de continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy. We hebben het hier over de continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy op de schaal van een punt, dat wil zeggen op de schaal van een zogenaamde representatief elementair volume. De doorlatendheid in de wet van Darcy op de punt-schaal is wel degelijk symmetrisch; deze symmetrie kan

theoretisch worden afgeleid uit de fundamentele stationaire Stokes-vergelijkingen, waaruit de wet van Darcy tevens is af te leiden.
Op het bovenvlak $z = 0$ van de watervoerende laag nemen we de stijghoogte $\varnothing\ (x, y, z, t)$ gelijk aan de grondwaterspiegel $H\ (x, y\ t)$, dat wil zeggen $\varnothing\ (x, y, 0, t) = H\ (x, y, t)$. Voor aquifers die voldoende dik zijn ten opzichte van de ruimtelijke hoogteverschillen van de grondwaterspiegel is dit een goede benadering.
Op de ondoorlatende basis $z = D$ geldt voor de verticale component van de volumestroomdichtheid $q_z\ (x, y, D, t) = 0$.
Verder nemen we de x-, y- en z-as als hoofdassen van de doorlatendheid en kiezen we de doorlatendheden in de twee horizontale richtingen gelijk aan $k_h\ (x, y, z)$ [m/d]; de doorlatendheid in de verticale richting kiezen we gelijk aan $k_z\ (x, y, z)$ [m/d].
De continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy, gecombineerd met boven gegeven randvoorwaarden, worden nu dus gegeven door de volgende welbekende vergelijkingen voor de vier onbekenden stijghoogte $\varnothing\ (x, y, z, t)$ [m], en componenten van de volumestroomdichtheid $q_x\ (x, y, z, t)$, $q_y\ (x, y, z, t)$ en $q_z\ (x, y, z, t)$ [$m^3/(m^2.d)$]:
continuïteitsvergelijking

$$\partial q_x\ (x, y, z, t)/\partial x + \\ + \partial q_y\ (x, y, z, t)/\partial y + \\ + \partial q_z\ (x, y, z, t)/\partial z = 0 \\ , 0 < z < D$$

wet van Darcy

$$q_x\ (x, y, z, t) = - k_h\ (x, y, z)\ \partial \varnothing\ (x, y, z, t)/\partial x \\ , 0 \leq z \leq D$$
$$q_y\ (x, y, z, t) = - k_h\ (x, y, z)\ \partial \varnothing\ (x, y, z, t)/\partial y \\ , 0 \leq z \leq D$$
$$q_z\ (x, y, z, t) = - k_z\ (x, y, z)\ \partial \varnothing\ (x, y, z, t)/\partial z \\ , 0 \leq z \leq D$$

randvoorwaarden

$$\varnothing\ (x, y, 0, t) = H\ (x, y, t)\ , z = 0$$
$$q_z\ (x, y, D, t) = 0\ , z = D$$

3. **Beknopte formulering en oplosmethode**

In het nu volgende zullen we de berekeningen zo kort mogelijk houden en bovendien zullen we een zo beknopt mogelijke notatie nastreven. De hier gegeven afleiding kan dan worden geverifieerd door degenen die hiervoor belangstelling hebben en de uiteindelijke conclusies zijn dus in principe controleerbaar. Aan de andere kant kunnen degenen die niet geïnteresseerd zijn in de wiskundige afleiding volstaan met het doornemen van de voornaamste stappen en vooral van de samenvatting en conclusies. Meer details worden gegeven door Zijl [1990].

Het in de vorige paragraaf gegeven stelsel vergelijkingen is equivalent met het volgende stelsel gekoppelde vergelijkingen [zie Brouwer en Zijl, 1988]:

$$\left.\begin{array}{ll} \partial s_i/\partial z - \sigma\ \partial\ (q_z/k_z)/\partial x_i = 0 & , 0 < z < D \\ s_i = - \partial H/\partial x_i & , z\ = \ 0 \end{array}\right\}$$
$$\left.\begin{array}{ll} \partial\ (k_h\ s_i)/\partial x_i + \partial q_z/\partial z = 0 & , 0 < z < D \\ q_z = 0 & , z\ = \ 0 \end{array}\right\}$$

In bovenstaande vergelijkingen vormen x_i en s_i, $i = 1,2$, een kortschrift-notatie voor de twee componenten $(x_1, x_2) = (x, y)$ en $(s_1, s_2) = (q_x, q_y)/k_h$. Als er in een term twee maal dezelfde index, zeg i, voorkomt moet er gesommeerd worden over die index. Verder geldt dat $\sigma = 1$; de rol van de parameter σ heeft te maken met de manier waarop we het bovenstaande stelsel vergelijkingen zullen oplossen.
Om een oplossing van bovenstaande stelsel vergelijkingen te vinden, passen we storingsrekening toe. Dit betekent dat we de onbekenden uitschrijven in de vorm van een reeksontwikkeling in σ:

$$s_i\ (x, y, z, t) = s_{i\,[0]}\ (x, y, z, t) + \\ \sigma\ s_{i\,[1]}\ (x, y, z, t) + \sigma^2\ s_{i\,[2]}\ (x, y, z, t) + \ldots$$
$$q_z\ (x, y, z, t) = q_{z\,[0]}\ (x, y, z, t) + \\ \sigma\ q_{z\,[1]}\ (x, y, z, t) + \sigma^2\ q_{z\,[2]}\ (x, y, z, t) + \ldots$$

Subtitutie van deze reeksen in de bovenstaande vergelijkingen, en gelijkstellen van gelijke machten van σ, levert de volgende vergelijkingen voor
$s_{i\,[0]}\ (x, y, z, t)$ en $q_{z\,[0]}\ (x, y, z, t)$:

$$\left.\begin{array}{ll} \partial s_{i\,[0]}/\partial z = 0 & , 0 < z < D \\ s_{i\,[0]} = - \partial H/\partial x_i & ,\ \ = \ 0 \end{array}\right\}$$
$$\left.\begin{array}{ll} \partial (k_h\ s_{i\,[0]})/\partial x_i + \partial q_{z\,[0]}/\partial z = 0 & , 0 < z < D \\ q_{z\,[0]} = 0 & ,\ \ = \ D \end{array}\right\}$$

De oplossing is:

$$q_{i\,[0]}\ (x, y, z, t) = - k_h\ (x, y, z) \\ \partial H\ (x, y, t)/\partial x_i$$
$$q_{z\,[0]}\ (x, y, z, t) = - \partial/\partial x_i\ [t\ (x, y, z) \\ \partial H\ (x, y, t)/\partial x_i]$$

waarin:

$$t\ (x, y, z) = \int_z^D k_h\ (x, y, z')\ dz'$$

De bovenstaande oplossingen noemen we in het vervolg de nulde-orde oplossingen.

4. **De Dupuit-benadering**

Definiëren we volumestroom in de i-richting per lengte-eenheid in de j-richting $(j \neq i)$ als:

$$Q_i\ (x, y, t) = \int_0^D q_i\ (x, y, z', t)\ dz'$$

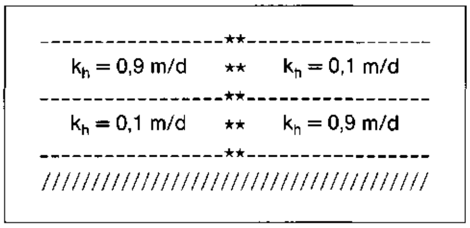
dan vinden we de welbekende Dupuit-vergelijkingen voor een aquifer met isotrope transmissiviteit:

$$Q_{x\,[0]}\ (x, y, t) = - T_{[0]}\ (x, y)\ \partial H\ (x, y, t)/\partial x$$
$$Q_{y\,[0]}\ (x, y, t) = - T_{[0]}\ (x, y)\ \partial H\ (x, y, t)/\partial y$$

Hierin wordt de transmissiviteit $T_{[0]}\ (x, y)$ gegeven door de welbekende uitdrukking:

$$T_{[0]}\ (x, y) = \int_0^D k_h\ (x, y, z')\ dz'$$

We vinden ook een uitdrukking voor $q_{z\,[0]}\ (x, y, 0, t)$, dat wil zeggen voor de verticale component van de volumestroomdichtheid op de grondwaterspiegel.
Deze uitdrukking is van belang als we een vergelijking voor $\partial H\ (x, y, t)/\partial t$, dat wil zeggen voor de evolutie in de tijd van de grondwaterspiegel, willen vinden, maar in de context van dit artikel over de transmissiviteit is dit niet zo relevant.
Bovenstaande uitdrukking voor de transmissiviteit is afgeleid voor zowel een perfect gelaagde ondergrond, dat wil zeggen voor een ondergrond waarin $\partial k_h/\partial x = \partial k_h/\partial y = 0$ en $\partial k_z/\partial x = \partial k_z/\partial y = 0$, als voor een ondergrond met horizontale heterogeniteit in de doorlatendheden.
Op grond van de situatie getekend in afb. 1 kunnen we inzien dat stroming in



Afb. 1 - Aquifer met dikte $D = 10$ m, bestaande uit twee lagen van 5 m dikte met een doorlatendheidsverdeling zoals aangegeven in de figuur. Hoewel de transmissiviteit overal gelijk is aan $T_{[0]} = 5{,}0\ m^2/d$ mogen we toch verwachten dat de stroming in werkelijkheid veel meer weerstand ondervindt in de buurt van de overgang (**) dan ver weg van de overgang.

een aquifer met horizontale heterogeniteiten in werkelijkheid heel anders zal zijn dan stroming in een perfect gelaagd aquifer. Dit betekent dat de hierboven gepresenteerde Dupuit-benadering en vooral de hierbij behorende uitdrukking voor de transmissiviteit, niet onder alle omstandigheden geldig zal zijn.

5. **Een correctie op de Dupuit-benadering**

Om te onderzoeken onder welke omstandigheden afwijkingen van de Dupuit-benadering optreden en om te zien hoe deze afwijkingen eruit zien, zullen we kijken naar de vergelijkingen voor $s_{i\,[1]}\ (x, y, z, t)$ en $q_{z\,[1]}\ (x, y, z, t)$.
Substitutie van de machtreeksen in σ in de vergelijkingen voor $s_i\ (x, y, z, t)$ en $q_z\ (x, y, z, t)$, en gelijkstellen van gelijke machten van σ, levert de volgende vergelijkingen voor $s_{i\,[1]}\ (x, y, z, t)$ en $q_{z\,[1]}\ (x, y, z, t)$:

$$\left.\begin{array}{ll} \partial s_{i\,[1]}/\partial z - \partial/\partial x_i\ (k_z^{-1}\ q_{z\,[0]}) = 0 & , 0 < z < D \\ s_{i\,[1]} = 0 & , z\ = \ 0 \end{array}\right\}$$
$$\left.\begin{array}{ll} \partial/\partial x_i\ (k_h\ s_{i\,[1]}) + \partial q_{z\,[0]}/\partial z = 0 & , 0 < z < D \\ q_{z\,[1]} = 0 & , z\ = \ D \end{array}\right\}$$

De oplossingen $s_{i\,[1]}\ (x, y, z, t)$ en $q_{z\,[1]}\ (x, y, z, t)$ kunnen uit bovenstaande vergelijkingen verkregen worden door substitutie van de eerder vermelde nulde-orde oplossingen $s_{i\,[0]}$ (x, y, z, t) en $q_{z\,[0]}$ (s, y, z, t). Dit leidt tot vrij ingewikkelde uitdrukkingen die we hier niet zullen presenteren. Er is echter een situatie waaronder de resultaten sterk vereenvoudigen. Dit is het geval als de grondwaterspiegel praktisch gesproken als vlak, maar niet noodzakelijk horizontaal, beschouwd mag worden. Wiskundig uitgedrukt, we beschouwen zodanige grondwaterspiegels H (x, y, t) dat termen waarin $\partial^2 H\,(x, y, t)/\partial x^2$, $\partial^2 H\,(x, y, t)/\partial x \partial y$ en $\partial^2 H\,(x, y, t)/\partial y^2$ voorkomen verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van andere termen. We vinden dan als oplossing:

$$q_{i\,[1]}\,(x, y, z, t) = -\,k_h\,(x, y, z)$$
$$\theta_{ij}\,(x, y, z)\,\partial H\,(x, y, t)/\partial x_j$$
$$q_{z\,[1]}\,(x, y, z, t) = -\,\partial/\partial x_i$$
$$[t'_{ij}\,(x, y, z)\,\partial H\,(x, y, t)/\partial x_j]$$

Hierin is:

$$t'_{ij}\,(x, y, z) = \int_z^D k_h\,(x, y, z')\,\theta_{ij}\,(x, y, z')\,dz'$$

$$\theta_{ij}\,(x, y, z) = \partial B_j\,(x, y, z)/\partial x_i$$

$$B_j\,(x, y, z) = \int_0^z k_z\,(x, y, z')^{-1}\,\partial t\,(x, y, z')/\partial x_j\,dz'$$

De bovenstaande oplossingen noemen we in het vervolg de eerste-orde correcties. We zien nu een matrix θ met componenten θ_{ij} te voorschijn komen:

$$\theta = \begin{Bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} \\ \theta_{21} & \theta_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \theta_{xx} & \theta_{xy} \\ \theta_{yx} & \theta_{yy} \end{Bmatrix}$$

Het is belangrijk om op te merken dat deze matrix in het algemeen niet symmetrisch is, dat wil zeggen dat in het algemeen $\theta_{ij} \neq \theta_{ji}$. Natuurlijk zijn er speciale gevallen waarin er wel symmetrie is. Bijvoorbeeld, als k_z geen functie van x en y is, is de matrix symmetrisch. De matrix θ is ook symmetrisch als de anisotropiefactor $k_h/k_z = f\,(z)$ onafhankelijk van x en y is, en als tegelijkertijd k_h geschreven kan worden als het produkt van een functie van z en een functie van x en y, dat wil zeggen als $k_h\,(x, y, z) = K\,(z)\,M\,(x, y)$. Deze theoretische voorbeelden komen echter zelden of nooit voor bij reële ondergronden.

6. De gegeneraliseerde Dupuit-benadering

Combinatie van de nulde-orde oplossing en de eerste-orde correctie hierop levert de volgende vergelijkingen:

$$Q_x = -\,T_{xx}\partial H/\partial x - T_{xy}\,\partial H/\partial y$$
$$Q_y = -\,T_{yx}\,\partial H/\partial x - T_{yy}\,\partial H/\partial y$$

en ook een vergelijking voor q_z (x, y, 0, t) die echter in de context van dit artikel over de anisotrope transmissiviteit niet zo relevant is. De hierboven gepresenteerde vergelijkingen zijn identiek aan de Dupuit-vergelijkingen zoals gepresenteerd in de inleiding. Echter, de vier componenten van de transmissiviteitsmatrix worden in bovenstaande vergelijkingen gegeven door meer ingewikkelde uitdrukkingen dan in de Dupuit-benadering. We kunnen hier dus spreken van een gegeneraliseerde Dupuit-benadering.
De vier componenten T_{xx}, T_{xy}, T_{yx} en T_{yy} worden gegeven door de volgende uitdrukkingen:

$$T_{xx}\,(x, y) = \int_0^D k_h\,(x, y, z')\,[1 + \theta_{xx}\,(x, y, z')]\,dz'$$

$$T_{xy}\,(x, y) = \int_0^D k_h\,(x, y, z')\,\theta_{xy}\,(x, y, z')\,dz'$$

$$T_{yx}\,(x, y) = \int_0^D k_h\,(x, y, z')\,\theta_{yx}\,(x, y, z')\,dz'$$

$$T_{yy}\,(x, y) = \int_0^D k_h\,(x, y, z')\,[1 + \theta_{yy}\,(x, y, z')]\,dz'$$

waarin θ_{xx}, θ_{xy}, θ_{yx} en θ_{yy} in de vorige paragraaf zijn gegeven. Omdat in het algemeen geldt dat $\theta_{xy} \neq \theta_{yx}$, is de transmissiviteit in het algemeen dus niet symmetrisch. Er bestaan derhalve ook geen hoofassen waarop de Dupuit-benadering in een eenvoudiger vorm kan worden geschreven.

Het zij opgemerkt dat bovenstaande uitdrukkingen voor de transmissiviteit slechts geldig zijn als de tweede-orde en hogere-orde correcties in de reeksontwikkelingen voor s_i en q_z voldoende klein zijn ten opzichte van de eerste-orde correcties. Is dit niet het geval, dan moeten ook hogere-orde termen worden meegenomen in de gegeneraliseerde transmissiviteit. De conclusie dat de Dupuit-benadering geldig is, zij het met een niet-symmetrische gegeneraliseerde transmissiviteit, blijft echter van kracht. Aan de andere kant geldt dat als de aquifer perfect gelaagd is, dat wil zeggen als $k_h = k_h\,(z)$ en $k_z = k_z\,(z)$, onafhankelijk van x en y, de gebruikelijke Dupuit-uitdrukking voor de transmissiviteit geldig is. Nu is een aquifer in werkelijkheid nooit perfect gelaagd, maar niet perfect glaagde, of kort gezegd gelaagde aquifers kunnen wel voorkomen. Met behulp van de hier gegeven theorie kunnen we definiëren wat we precies bedoelen met (niet-perfect) gelaagd. Als $\sqrt{(\theta_{xx}^2 + \theta_{yx}^2 + \theta_{yx}^2 + \theta_{yy}^2)} \ll 1$ is de gebruikelijke Dupuit-uitdrukking voor de transmissiviteit een goede benadering en in dat geval noemen we de aquifer gelaagd.

7. Conclusie

In dit artikel is aangetoond dat de welbekende Dupuit-benadering ter beschrijving van grondwaterstroming in perfect gelaagde aquifers, onder zekere condities gegeneraliseerd kan worden naar aquifers waarin horizontale heterogeniteiten in de doorlatendheden voorkomen. Voor horizontaal heterogene aquifers moet de bekende Dupuit-uitdrukking voor de relatie tussen doorlatendheid en transmissiviteit worden uitgebreid. Deze uitbreiding laat zien dat de transmissiviteit in het algemeen niet-symmetrisch is. Wegens het niet-symmetrisch zijn van de gegeneraliseerde transmissiviteit bestaan er ook geen hoofdassen waarlangs de Dupuit-vergelijkingen in vereenvoudigde vorm kunnen worden uitgeschreven. Dit heeft gevolgen voor de toepasbaarheid van de gebruikelijke numerieke modelcodes.
Er is ook een criterium afgeleid dat aangeeft wanneer een aquifer beschouwd mag worden als een gelaagde aquifer, waarvoor de gebruikelijke Dupuit-uitdrukking voor de transmissiviteit wel mag worden gebruikt als goede benadering.

Literatuur

Brouwer, G. K. en Zijl, W. (1988). *Regionale grondwaterstroming: driedimensionale numerieke en analytische oplossingen.* H_2O nr. 6, 1988.

Zijl, W. (1990). *Natuurlijke grondwaterstroming in sedimentaire bekkens (de rol van grondwaterstroming in regionale stromingsstelselanalyses), Collegedictaat nr. 650/1010/1.* Vrije Universiteit Amsterdam.

● ● ●

Algemeen directeur drs. K. Kleijwegt van de Drinkwaterleiding Rotterdam (DWL) overleden

Het is onze droevige plicht u mee te delen dat volslagen onverwacht de Algemeen Directeur van de Drinkwaterleiding Rotterdam (DWL) en Algemeen Directeur van de NV Waterleidingbedrijf Zuid-Holland-Zuid (WZHZ) de heer drs. K. Kleijwegt op zaterdag 7 september jl. is overleden.
Juist voor het drukken van deze editie ontvingen wij dit droeve bericht. In een volgend nummer verschijnt een in memoriam. Zijn vrouw en kinderen wensen wij sterkte met dit verlies.