
Vrije grondwaterspiegels en kwelvlakken

Numerieke modellering van 2 niet-lineaire aspecten van grondwaterstroming

J.M.A. Streng en W. van Ellen

Bij het simuleren van grondwaterstroming blijkt de relatie tussen het aquifersysteem en de omgeving soms niet-lineair. Dit is bijvoorbeeld het geval bij droogvallende sloten en bij kweloppervlakken (als de grondwaterstand tot aan het maaiveld reikt). In het verleden (rond 1992) werden wij met een soortgelijk probleem geconfronteerd toen we met behulp van MODFLOW de freatische lijn in een dijklichaam wilden berekenen. Als gevolg van de sterk inhomogene bodemopbouw bleken er cellen in het model droog te vallen, hetgeen tot ongewenste resultaten leidde. We hebben destijds besloten om MODFLOW aan te passen.

In dit artikel willen wij:

- 1 de uitgevoerde aanpassingen aan het algoritme globaal beschrijven;*
- 2 de correctheid ervan bewijzen aan de hand van 3 vraagstukken op het gebied van grondwaterstroming met een gegeven oplossing;*
- 3 een vergelijking maken tussen de aangepaste MODFLOW-versie (vanaf hier MODFLOW-WL genoemd) en andere programma's voor het berekenen van grondwaterstroming in verticale dwarsdoorsneden met een vrij oppervlak.*

Sinds het in gang zetten van de ontwikkelingen die in dit artikel beschreven worden, zijn er nieuwere versies van MODFLOW verschenen, waarin vergelijkbare aanpassingen zijn geïmplementeerd. De auteurs hebben alleen ervaring met het gebruik van deze modules (BCF2 en BCF3) opgedaan bij het doorrekenen van een van de case-studies in dit artikel. Uiteraard zijn we zeer geïnteresseerd in ervaringen van lezers die er in de praktijk meer mee gewerkt hebben.

J.M.A. Streng is werkzaam bij het Ingenieursbureau Geotechniek van Gemeentewerken Rotterdam, Postbus 6633, 3002 AP Rotterdam, telefoon: (010) 489 79 39, fax: (010) 478 05 95, E-mail: igliba@gw.gem-rotterdam.nl.

W. van Ellen is werkzaam bij het Waterloopkundig Laboratorium, afdeling Regionaal Waterbeheer en Milieu, Postbus 177, 2600 MH Delft, telefoon (015) 285 84 61, fax: (015) 285 85 82, E-mail: wybrand.vanellen@wldelft.nl.

1 Wat ontbrak er aan MODFLOW?

Bij het toenmalige MODFLOW (versie 1.3, 1988) was er een bekende complicatie: een eenmaal drooggevallen cel loopt nooit meer onder. Dit is een probleem bij niet-stationaire simulaties, wanneer de grondwaterstand weer kan stijgen bij overgang van een periode met verdampingsoverschot naar een periode met neerslagoverschot. Bovendien kan dit droogvallen gebeuren als onderdeel van een iteratieve berekening, hetgeen een nog minder wenselijk effect is. Afhankelijk van de kwaliteit van de beginschatting van de te berekenen potentiaalverdeling kunnen er namelijk grote sprongen in berekende potentiaal optreden, afwisselend naar boven en naar beneden. Deze slingerbeweging convergeert doorgaans, maar in dit proces kan een cel ten onrechte voor de rest van de simulatie drooggelegd worden. Bestudering van de modelcode leerde, dat bovendien de oorspronkelijk aan de cel toegekende doorlatendheid werd vervangen door een extreme waarde.

In MODFLOW wordt laagsgewijs aangeduid of cellen droog kunnen vallen of niet (voor de programmeurs onder de lezers: dit wordt opgeslagen in de array LAYCON, hetgeen staat voor Layer Conversion).

Kweloppervlakken kunnen niet specifiek ingevoerd of berekend worden. Een veel gebruikte methode is om gebruik te maken van de DRAIN-module in MODFLOW. Daarmee is te bewerkstelligen dat de grondwaterpotentiaal nooit hoger komt dan een door de gebruiker te kiezen niveau. Wanneer dit niveau gelijk gekozen wordt aan de maaiveldhoogte en tegelijkertijd wordt een zeer lage drainageweerstand ingevoerd, dan reageren alle cellen met een dergelijke drain als onderdeel van een kweloppervlak.

Bij het gebruik van de DRAIN-module in MODFLOW om de interactie met het maaiveld (kweloppervlakken) te simuleren, moet ervoor gewaakt worden dat de drains worden gekoppeld aan de juiste roostercellen. Het drainniveau (= de maaiveldhoogte) dient te liggen tussen de top en de onderkant van de cel waaraan de drain wordt toegekend.

2 Hoe gaan andere modellen om met freatische vlakken en kweloppervlakken?

2.1 GROVERPLA

In de periode van het ontstaan van de ideeën over de aanpassing van MODFLOW waren beide auteurs in dienst van het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. In eigen beheer had dit instituut een grondwaterstromingsmodel ontwikkeld op basis van de eindige-elementen-methode, genaamd GROVERPLA. De naam is een afkorting van GROundwaterflow in a VERTical PLANE. Dit model bevat een wiskundig zeer elegante methode om de berekening van de positie van het freatisch vlak uit te voeren. De ligging van dit vlak (waarvan de positie a priori onbekend is) bepaalt een deel van de begrenzing van het domein waarbinnen de grondwaterstromingsvergelijking opgelost moet worden. Uitgaande van een initiële schatting wordt een rooster van driehoekige elementen gegenereerd. Met deze schatting wordt een eerste iteratieronde uitgevoerd. De gevonden potentiaalverdeling wordt getoetst voor de knooppunten op het freatisch vlak. Zo nodig wordt de verticale positie van deze knopen aangepast aan de berekende waarde van de potentiaal, waarna een nieuwe berekening wordt uitgevoerd. Dit wordt net zolang herhaald totdat voor alle knooppunten die deel uitmaken van het freatische vlak een potentiaal wordt uitgerekend die correspondeert met de hoogteligging.

De geohydrologische eigenschappen (de horizontale en verticale doorlatendheden k_h en k_v en de porositeit μ) van de ondergrond worden gedefinieerd door voor een willekeurig aantal rechthoekige gebieden deze parameterwaarden op te geven. Per driehoekig element wordt de naar oppervlakte gewogen gemiddelde waarde van k en μ berekend.

De aanpassing van de verticale positie van de knooppunten op het freatisch vlak leidt tot vervorming van onderliggende elementen (het netwerk 'ademt mee met de iteratie' noemen we dat). In principe wordt deze vervorming gelijkmatig verdeeld over alle elementen tot aan de basis van het model, die zelf natuurlijk niet mee beweegt. Deze werkwijze leidt echter tot de complicatie dat na iedere iteratieronde de waarde voor de geohydrologische parameters van de van vorm veranderde elementen opnieuw berekend moet worden. Voor de eerste projectmatige toepassing van GROVERPLA (berekening van het kweloppervlak in een verticale dwarsdoorsnede door een beekdal) was dit geen probleem, omdat de ondergrond als een homogene watervoerende laag op een ondoorlatende basis geschematiseerd was.

Dit leidde echter tot ongewenste effecten bij inhomogene dwarsdoorsneden. Graven in de modelcode en de overvloedige uitvoer bracht de oorzaak aan het licht: dit modelknooppunt steeg steeds bij iteratieronde N tot juist in een slechtdoorlatende zone en bij ronde $N+1$ zakte het er net weer uit. Anders geformuleerd: het netwerk ademt, maar de bodem niet! Het gevolg was, dat een boven gelegen punt afwisselend wel en niet deel uitmaakte van het freatisch vlak.

Toen de oorzaak eenmaal duidelijk was, is de oplossing gevonden in het benutten van de mogelijkheid om bepaalde knooppunten uit het netwerk in hoogte te fixeren.

Deze hobbel was daarmee genomen. Aldus werd echter een sterke vervorming van de 'freatische' eindige elementen teweeggebracht. Dit vormde de volgende hobbel: inconsistenties in de berekende waterfluxen. Daarover zal mogelijk op een ander moment nog eens iets verschijnen in dit blad.

2.2 MSEEP

In de geotechnische wereld wordt veel gebruik gemaakt van het programma MSEEP, ontwikkeld en geëxploiteerd door Grondmechanica Delft (GD). Ook dit programma is gebaseerd op de eindige-elementen-methode. Het elementennetwerk ademt net als bij GROVERPLA mee met de iteratieprocedure. De ondergrond wordt gespecificeerd als lagen met constante geohydrologische eigenschappen. Deze lagen strekken zich steeds uit over de gehele lengte van de dwarsdoorsnede, maar mogen wel een dikte van 0 hebben.

Er is een belangrijke beperking gelegen in het feit dat bij MSEEP freatische knopen in een en dezelfde (bovenste) modellaag dienen te liggen. Er dient dus direct de juiste modellaag te worden gekozen. Blijkt deze laag fout gekozen/geschat, dan moet iteratie plaatsvinden door de gebruiker (wijzigen van de schematisatie) in plaats van door het model. Het doorrekenen

van inhomogene dwarsdoorsneden is dus ook maar beperkt mogelijk, omdat vooraf bekend moet zijn in welke laag de te berekenen freatische lijn zich zal bevinden.

Een andere beperking is gelegen in het feit dat kweloppervlakken niet worden berekend, maar van tevoren moet worden opgegeven voor welke knopen deze randvoorwaarde van toepassing is. Ook hier geldt dat de berekeningsresultaten achteraf getoetst moeten worden (treedt er daadwerkelijk uitstroming op in de betreffende knopen. Als de toets een negatief resultaat oplevert, moet de berekening herhaald worden met gecorrigeerde invoer, net zolang tot de de iteratie door de gebruiker moet worden uitgevoerd; idealiter zou het programma deze taak over moeten nemen.

3 Wat is er aan gedaan?

3.1 Uitgangspunten bij geohydrologische schematisaties

MODFLOW moest dus worden aangepast om de niet-lineariteit die het gevolg is van de freatische randvoorwaarde zo goed mogelijk te kunnen simuleren. Daarbij is het uitgangspunt geweest om de uitbreiding zo algemeen mogelijk op te zetten, dus niet a priori beperkt tot 2-dimensionale verticale dwarsdoorsneden. Dit vloeide voort uit de wens om een zo veelzijdig mogelijk instrument te hebben, waarmee ook werkelijk 3-dimensionale stroming berekend kan worden. Berekening van grondwaterstroming in een verticale dwarsdoorsnede is dan slechts een bijzonder geval van de algemene vraagstelling.

Bij de aanpassing van MODFLOW is verder als uitgangspunt gekozen, dat het rooster van eindige differentie-cellen uit horizontale lagen wordt opgebouwd, die naadloos op elkaar aansluiten. Met andere woorden: het modelrooster is gebiedsdekkend dan wel 'ruimte-vullend'. De hoogte van de top en onderkant is dus voor iedere cel in een laag hetzelfde. De bovenbegrenzing van dit modelrooster dient op een zodanig niveau te liggen, dat de grondwaterspiegel er zeker onder ligt. Een vanzelfsprekende bovenbegrenzing is dan natuurlijk het maaiveldniveau, omdat de grondwaterspiegel in principe nooit (ver) daarboven zal stijgen. Bij ontbreken van deze gegevens kan meestal wel een zekere schatting uitgevoerd worden. Deze werkwijze is weliswaar inefficiënt (er is sprake van een onnodig groot aantal niet-actieve roostercellen waarvoor wel geheugen- en schijfruimte vereist is), maar biedt wel maximale vrijheid met betrekking tot het schematiseren van willekeurig inhomogene dwarsdoorsneden met grillige randvoorwaarden. Alle cellen in het modelrooster kunnen in principe droogvallen, tenzij hiervoor een vaste potentiaal is opgegeven.

3.2 Droogvallen / vernatten van cellen

Om freatische vlakken en kweloppervlakken voor willekeurige 3-D MODFLOW-schematisaties te kunnen berekenen, hebben wij een aanpassing aan het iteratieve oplos-algoritme voor de grondwaterstromingsvergelijking in MODFLOW aangebracht. In het oorspronkelijke MODFLOW model wordt na iedere iteratieronde per cel getoetst of de berekende potentiaal boven de onderkant van de betreffende cel ligt. Zo nee, dan wordt de cel voor de rest van de simulatie drooggelegd (gedeactiveerd). Dit kan alleen voor cellen in lagen die in de MODFLOW-invoer aangemerkt zijn als 'droogvalbaar'. In de aangepaste versie wordt deze laatste beperking voor freatische simulaties opgeheven: iedere cel kan daarin droogvallen

(met uitzondering van zogenaamde fixed head cellen). De toets wordt na een door de gebruiker op te geven aantal iteratieronden uitgevoerd en bestaat uit de volgende stappen:

- bepaal of de berekende potentiaal ligt onder de bodem van de cel. Zo ja, dan de cel droogleggen. De doorlatendheid blijft echter ongewijzigd.
- bepaal of de berekende potentiaal boven de onderkant van de bovenliggende cel ligt, terwijl deze niet actief is. Zo ja, dan de bovenliggende cel vernatten (activeren) en een waarde voor de potentiaal toekennen gelijk aan die van de onderliggende cel.

Het modelnetwerk wordt kolom na kolom van beneden naar boven doorlopen (met IZ als hardstlopende index).

Een belangrijke toevoeging is verder, dat voor aanvang van de simulatie getoetst wordt of de startwaarde voor de potentiaal in een cel niet beneden de bodemhoogte ligt.

3.3 *Kweloppervlakken*

Het optreden van kweloppervlakken aan het maaiveld is een ander soort van niet-lineairiteit waaraan ook een mouw gepast diende te worden. Meestal wordt de oplossing voor deze interactie gezocht in het simuleren van drains met een zeer lage drainageweerstand. Door de drainhoogte gelijk te kiezen aan het maaiveldniveau wordt bereikt dat de berekende grondwaterstand nauwelijks boven het drainniveau en dus het maaiveld uitkomt; het berekende drainagedebiet kan beschouwd worden als het berekende kweldebiet.

In het onderhavige project is een andere benadering gekozen, die naar ons idee nauwer aansluit bij de werkelijkheid. De methode (die dus uitsluitend van toepassing is op vraagstukken met een vrije freatische grondwaterspiegel) volgt eenzelfde procedure als beschreven voor het vernatten en droogleggen van cellen. Na iedere N iteratieronden wordt kolom voor kolom getoetst of de potentiaal in de cel waarin zich het maaiveldniveau bevindt hoger is dan het maaiveldniveau. Zo ja, dan wordt de status van die cel gewijzigd in 'Seepage Face' met een potentiaal gelijk aan maaiveldniveau. Dit is in feite een 'Fixed Head' status, maar met dit verschil dat deze status weer gewijzigd kan worden in een 'normaal' actieve cel. Daarnaast wordt voor de cellen die de status Seepage Face hebben gekregen gedurende voorafgaande iteratieronden de waterbalans getest. Indien de waterbalans een overschot oplevert ('uitstroming') dan kan geconcludeerd worden dat de status 'Seepage Face' in overeenstemming is met de berekeningsresultaten. Is dit niet het geval (de cel met constante potentiaal introduceert juist water in het model), dan wordt de status van de cel weer veranderd in 'normaal actieve cel'.

3.4 *Problemen bij de aanpassingen*

Een probleem bij de implementatie van de methode bleek, dat de convergentie traag verloopt. Het is bij deze methode het immers mogelijk, dat het freatisch vlak zich juist bevindt op de overgang tussen twee cellen in dezelfde modelkolom. Bij vernatten van de bovenste cel treedt er een waterbalansfout op die noopt tot droogleggen. Dit heeft weer tot gevolg dat in de volgende iteratieronde de potentiaal in de onderste cel weer tot boven de onderkant van de bovenbuur leidt. Dit effect is enigszins te dempen door aan het vernatten een extra

voorwaarde te verbinden, te weten dat de te vernatten cel bij vernatten minimaal 10% onderloopt. Zo nodig wordt de berekende potentiaal hierop aangepast.

Om maximale beïnvloeding van het convergentieproces te verkrijgen is een aantal invoerparameters toegevoegd. De implementatie van de methode heeft plaatsgevonden in het SIP-package, waarvoor de invoerformulering is gewijzigd en uitgebreid. De wijzigingen en uitbreidingen behelzen:

- het aantal aanpassingsronden (= malen dat de activiteitsparameter IBOUND wordt aangepast aan het berekeningsresultaat) moet opgegeven worden
- per aanpassingsronde wordt een potentiaal criterium, een waterbalans criterium en een maximaal aantal iteraties opgegeven.
- convergentie treedt pas op wanneer niet alleen aan de criteria voor potentiaal en waterbalans is voldaan maar ook uit de toets blijkt dat bij het gegeven berekeningsresultaat geen aanpassing van IBOUND meer vereist is.

3.5 MODFLOW-versie met BCF2/BCF3-modules

Gedurende de periode waarin de hiervoor beschreven aanpassingen aan MODFLOW werden uitgevoerd en er gebruikservaring mee werd opgedaan, is een nieuwere versie (met aangepaste BCF-module) beschikbaar gekomen. Het leek natuurlijk aardig om de case die is doorgerekend met GROVERPLA (het beekdal met het uniform hellende maaiveld), ook met deze MODFLOW versie door te rekenen.

De BCF3-versie is op 2 aspecten na identiek aan de BCF1-versie: ten eerste is in de BCF3-versie de mogelijkheid toegevoegd om droge of drooggevallen cellen te vernatten (re-wetting) en bovendien kan een meer geavanceerde methode gebruikt worden om de cell-to-cell conductance te berekenen. Voor gedetailleerde informatie over het vernattings-algoritme wordt verwezen naar USGS (1991 en 1992).

Het vernattings-algoritme bewerkstelligt dat droge of drooggevallen cellen per kunnen vernatten. Naar keuze van de gebruiker kan het vernatten gebeuren na een (vrij te kiezen) aantal iteraties, of aan het einde van een tijdstap. De hier gepresenteerde case-studies betreffen alle stationaire situaties, zodat alleen de laatste methode tot een zinvolle vergelijking leidt. (Het vernatten aan het eind van een tijdstap lijkt ons conceptueel minder aantrekkelijk). De gebruiker geeft per cel een drempelwaarde aan, op grond waarvan het algoritme besluit of een cel vernat wordt. De drempelwaarde wordt vergeleken of met de laatstberekende potentialen van de buurcellen in dezelfde laag of met de laatstberekende potentiaal van onderliggende cel. Deze laatste methode is eveneens gebruikt in de aangepaste versie van MODFLOW (zoals beschreven in § 3.2 en § 3.4). De potentiaal in een te vernatten cel wordt gelijk gesteld aan de som van de bodemhoogte van de cel vermeerderd met het product van een zogenaamde wetting factor en de opgegeven drempelwaarde.

Het toekennen van een drempelwaarde per cel (in tegenstelling tot het algoritme in MODFLOW-WL) biedt een goede mogelijkheid om het droogvallen en onderlopen van cellen te controleren. In de toepassings-praktijk kan het zo zijn dat boven een bepaalde diepte (bijvoorbeeld boven de bodem van een bouwput waarin een betonvloer ligt) geen actieve cellen meer voor kunnen komen, terwijl elders in het

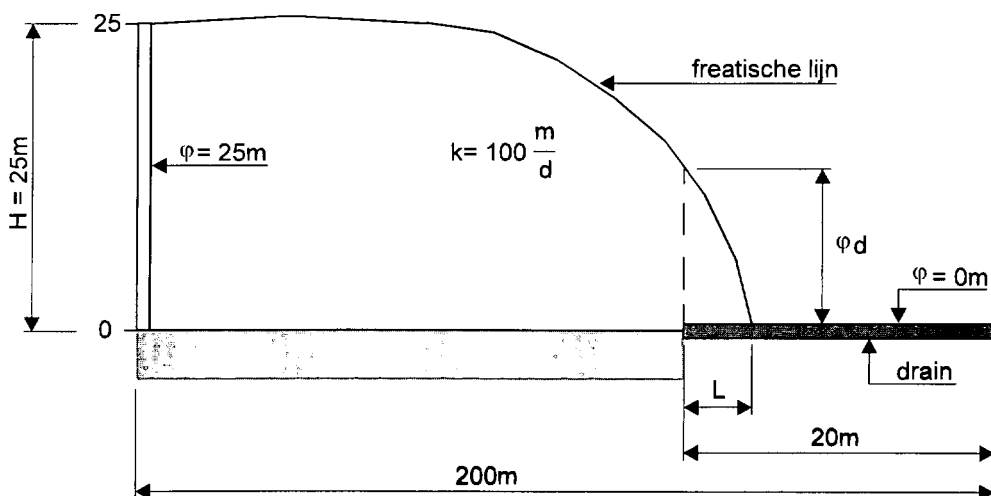
model — buiten de bouwput bijvoorbeeld — in dezelfde of hoger gelegen modellen wel degelijk van een vrije waterspiegel sprake is. Een van de auteurs heeft er in dat specifieke geval voor gekozen om een speciale waarde voor de activiteitsparameter in te voeren, die aangeeft dat cellen boven de betreffende cel niet vernat mogen worden. Deze methode werkt ook, en heeft bovendien het voordeel dat er geen extra invoer-array behoeft te worden gedefinieerd.

4 Toetsing van de correctheid van het algoritme

4.1 'Flow in a drained dam on an impervious base'

Ter toetsing van de ontwikkelde MODFLOW-versie zijn 3 testcases doorgerekend. Het betreft 2 stromingsgevallen waarvoor een analytische oplossing bekend is. Het eerste doorgerekende geval betreft 'Flow in a drained dam on an impervious base'. De situatieschets is in figuur 1 gegeven. Toepassing van een analytische oplosmethode (hodograaf), zoals beschreven in (Verruijt, 1982) leidt tot het inzicht dat de freatische lijn de vorm van een parabool heeft. De afstand L tot het snijpunt tussen freatische lijn en de drain bedraagt $Q/2k$; recht boven het beginpunt van de drain ligt het freatisch vlak op een niveau van Q/k .

Voor de som met MODFLOW-WL is gekozen voor $k_h = k_v = 100 \text{ m/d}$; de 20 m lange drain heeft een oneindige doorlatendheid gekregen met aan het benedenstroomse einde een constante potentiaal van 0. Het berekende debiet bedraagt ca. $410 \text{ m}^3/\text{d}$ per m dwarsdoorsnede. Hieruit volgt dat het snijpunt tussen de freatische lijn en de drain op ruim 2 m vanaf het beginpunt moet liggen. Dit volgt ook uit de simulatieresultaten (zie figuur 1 voor de berekende positie van het freatische vlak). De hoogte van het freatische niveau boven het eindpunt van de drain zou 4,1 m moeten bedragen. Ook dit komt tot uitdrukking in de modelresultaten.



Figuur 1: Schematisatie voor case 1: 'Flow in a drained dam on an impervious base'.

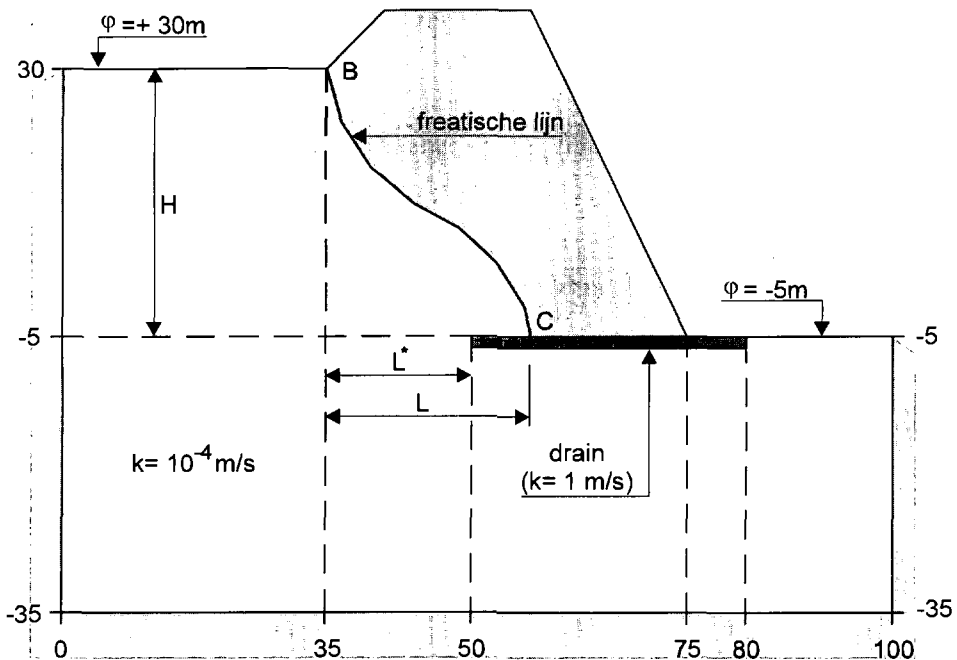
De waterbalans gaat echter mank: naarmate verder bovenstrooms een controlevolume beschouwd wordt, neemt het over de verticaal geïntegreerde debiet af. Dit is het gevolg van cumulatieve afrondingsfouten. (De gradiënten zijn bovenstrooms extreem klein, van dezelfde grootte-orde als de nauwkeurigheid waarmee getallen intern in de computer worden opgeslagen).

4.2 'Flow in a drained dam on a pervious base'

Het tweede doorgerekende geval is hetzelfde als het eerste met dit verschil dat de ondergrond ook doorlatend is. Bovendien is nu zowel bovenstrooms als benedenstrooms een poldergebied met een constant polderpeil aanwezig (zie figuur 2). Dit geval wordt beschreven in (Verruijt, 1970). De analytische oplossing voor de ligging van de freatische lijn tussen de punten B en C heeft in dit geval een vorm die beschreven wordt door de vergelijking

$$x = L \cos^2\left(\frac{\pi y}{2H}\right) \quad (1)$$

waarin x de horizontale afstand vanaf punt B voorstelt en y de hoogte ten opzichte van de drain. Een grafiek van deze functie is opgenomen in figuur 3.



Figuur 2: Schematisatie voor case 2: 'Flow in a drained dam on a pervious base'.

De waarde van L (de horizontale afstand tussen punten B en C, waar de freatische lijn de drain snijdt) kan bepaald worden uit de volgende relatie:

$$\frac{L^*}{H} = \frac{1}{2} \frac{L}{H} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{\pi L} \right)^2} - \frac{2H}{\pi L} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{2H}{\pi L} \right) \right\} \quad (2)$$

Dit is een zodanig complexe vorm, dat in (Verruijt, 1982) een grafiek gepresenteerd wordt van H/L^* tegen L/L^* . Deze grafiek is in de inzet van figuur 3 weergegeven. De afstand tussen het eindpunt van de drain en het snijpunt tussen freatische lijn en de drain is gelijk aan $L^* - L$. In het doorberekende geval geldt $H = 35$ m en $L^* = 15$ m. Bij een waarde van H/L^* van $35/15 = 2,33$ hoort een waarde van L/L^* van 1,37. Daaruit volgt dat $L - L^*$ een waarde heeft van ca. 5,6 m. Het verloop van de freatische lijn die volgt uit de MODFLOW berekening is eveneens getekend in figuur 3.

Over het algemeen correspondeert de MODFLOW-oplossing goed met de theoretische waarde. Vorm en positie van de lijn zijn correct (verticale raaklijnen aan de uiteinden), maar het snijpunt met de drain ligt ca. 2 m teveel naar links. Er treedt een lichte afwijking op, omdat de drain een eindige doorlatendheid heeft.

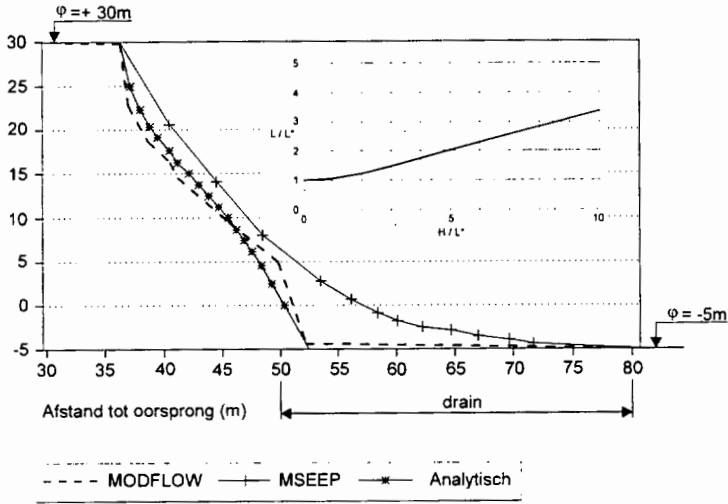
4.3 Kweloppervlak in een beekdal met hellend maaiveld

Het derde doorberekende geval betreft een homogene verticale dwarsdoorsnede door een beekdal met een licht hellend maaiveld. De nuttige neerslag bedraagt 1,0 mm/d en bovendien treedt er een uniforme kwel op met een intensiteit van 0,5 mm/d. De modelschematisatie is gegeven in figuur 4. Met GROVERPLA is voor dit stromingsgeval een lengte van het kweloppervlak berekend van ca. 70 m en een maximale opbolling van 1,30 m boven de drainagebasis. Bij diverse beginschattingen van de grondwaterstand is met de aangepaste MODFLOW-versie steeds een lengte van het kweloppervlak gevonden tussen de 66 en de 70 m en een maximale opbolling die niet meer dan 1 à 2 cm afwijkt van de waarde van 1,30 m. De relatief grote marge in gevonden waarden van de lengte van het kweloppervlak is toe te schrijven aan het convergentieproces. Ter plaatse van het (theoretische) kweloppervlak hebben de modelcellen de neiging om per aanpassingsronde afwisselend droog en watervoevend te zijn.

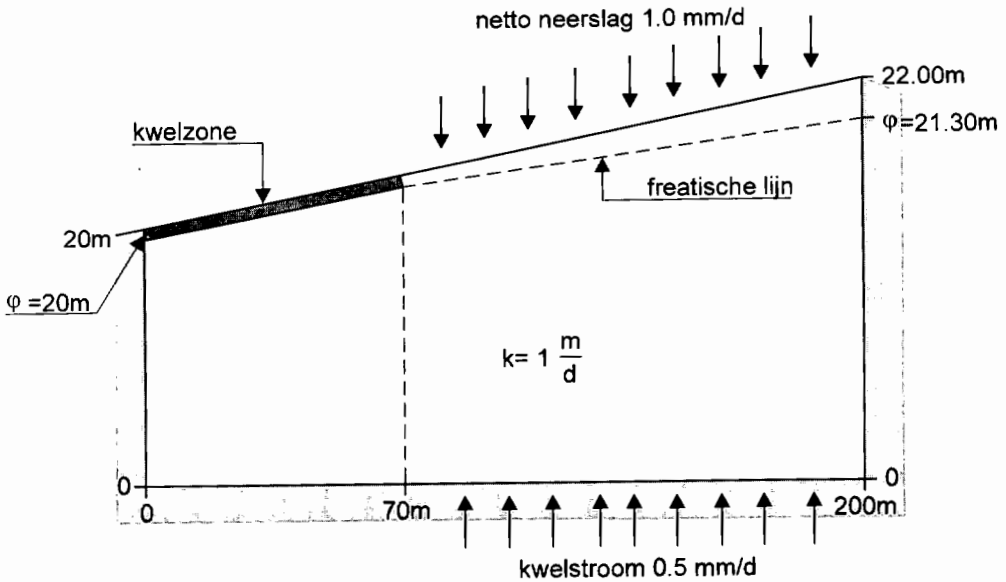
Het resultaat van de berekening met de BCF3-versie van MODFLOW stemt goed overeen met de resultaten van GROVERPLA en MODFLOW-WL. Bij een wetting factor van 0.1 en kleiner strekt het kweloppervlak zich uit over een lengte van 72 m (36 cellen). De maximale opbolling komt overeen met de maximale opbolling van 1.30 m zoals gevonden met de andere programma's.

Verloop freatische lijn

Drain in dijk op doorlatende ondergrond



Figuur 3: Freatische lijn voor probleem 2 volgens analytische formule, MSEP en MODFLOW-WL.



Figuur 4: Schematisatie voor case 3: 'Kweloppervlak in een beekdal'.

5 Vergelijking van MODFLOW-WL met andere programma's

5.1 Analytische gevallen (MSEEP versus MODFLOW-WL)

De oplossing die met MODFLOW gevonden is (met horizontale en verticale stappen van 1 m) benadert de analytische oplossing zeer goed. Dit is aanzienlijk beter dan de oplossing die met MSEEP voor dit stromingsgeval is gevonden (zie hiervoor verder de handleiding van MSEEP versie 4.2 (Delft Geotechnics, 1993). Voor het tweede geval (gedraineerde dam op een doorlatende ondergrond) gaat de MSEEP-oplossing ook mank aan het feit dat de watervoerende dikte in een modellaag nooit kleiner mag worden dan 5 cm.

De convergentie van de berekening bij MSEEP verloopt vele malen sneller dan bij MODFLOW. Dit is voor ten dele verklaarbaar uit het feit dat knopen met een kwel-randvoorwaarde bij MSEEP vooraf opgegeven moeten worden.

Als voordeel van het blokvormig MODFLOW-rooster is nog te noemen dat roostergeneratie en overlay bewerkingen ter bepaling van parameterwaarden doorgaans veel eenvoudiger zijn dan bij driehoeksnetwerken.

5.2 GROVERPLA versus MODFLOW-WL

Als belangrijkste verschil komt uit de vergelijking van deze 2 modellen naar voren dat de convergentie bij de GROVERPLA-som sneller verloopt dan bij de MODFLOW-variant. Het contrast is bij het gekozen voorbeeld echter veel minder groot dan tussen MSEEP en MODFLOW bij de analytische gevallen.

Ook hier is als voordeel van het blokvormig MODFLOW-rooster te noemen dat roostergeneratie en overlay bewerkingen ter bepaling van parameterwaarden doorgaans veel eenvoudiger zijn dan bij driehoeksnetwerken.

5.3 Resterende beperkingen aan MODFLOW-WL

Een tekortkoming (bijvoorbeeld ten opzichte van GROVERPLA) blijkt bij de simulatie van een verticale (slecht-)doorlatende wand. Een ondoorlatende wand (bijvoorbeeld een damwand) kan eenvoudig geschematiseerd worden door een dunne kolom inactieve cellen in te voegen in een MODFLOW-model. Als de wand echter lek is (hetgeen bij damwanden tot op zekere hoogte het geval kan zijn), kan de methode dit niet correct simuleren. Alleen in bovenste actieve cel in een kolom kan kwel optreden; in werkelijkheid kan ook horizontaal water uittreden uit de onderliggende cellen. Wanneer dit a priori bekend is kan natuurlijk steeds een general head boundary condition ingevoerd worden voor de betreffende cellen. Met drains is dit m.i. niet goed te doen, omdat de grondwaterstand in een cel met een drain mogelijk niet voldoende ver boven het drainniveau (= gemiddelde hoogteligging cel) uitkomt om de bovenliggende cel te vernatten. Bovendien is de in te voeren drainageweerstand niet op een meetbare grootheid terug te voeren. Een methode om deze randvoorwaarde correct in MODFLOW te incorporeren is niet gezocht in het kader van het onderhavige project.

6 Conclusies

Het resultaat van de beschreven aanpassingen aan MODFLOW is, dat er een instrument verkregen is om in een qua doorlatendheid zeer inhomogene verticale dwarsdoorsnede een berekening uit te voeren van de ligging van het freatische vlak. De ligging van een eventueel kweloppervlak wordt als berekeningsresultaat verkregen. De bodem kan tot een zodanig groot aantal horizontale modellen geschematiseerd worden, dat willekeurige grenzen van ondoorlatende gedeelten voldoende nauwkeurig gevolgd kunnen worden.

De correctheid van het algoritme is aangetoond aan de hand van vergelijking met 3 stromingsgevallen waarvan een oplossing bekend is. Een numeriek model dat in staat blijkt de analytische resultaten te reproduceren kan ook ingezet worden om inhomogene dwarsdoorsneden, afwijkende randvoorwaarden en 3-dimensionale situaties door te rekenen.

Over de vraag in hoeverre de functionaliteit van MODFLOW-WL door de BCF3-module wordt overtroffen (of juist omgekeerd) kunnen wij geen uitsluitsel geven op grond van onze ervaringen.

Literatuur

- Delft Geotechnics (1993)** Department of Mathematics and Data Processing. User's Manual PC-Model MSEP; Delft.
- USGS (1991)** A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model; USGS Open-File Report 91-536.
- USGS (1992)** Finite-difference interblock transmissivity for unconfined aquifers and aquifers having smoothly varying transmissivity; U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 92-4124.
- Verruijt, A. (1970)** Theory of Groundwater Flow, 1^e druk, pag 134-136; The MacMillan Press Ltd, London and Basingstoke.
- Verruijt, A. (1982)** Theory of Groundwater Flow, 2^e druk, pag 64-65. The MacMillan Press Ltd, London and Basingstoke.
- WL Delft (1986)** Modelling Ca^{2+} in grondwater, fases 1 t/m 3; WL rapport no. R2134/T0108, februari 1985 - november 1986.