
Koppeling Duflow-MicroFem

Frank Smits
Kick Hemker

Bij het rekenen met stromingsmodellen voor oppervlaktewater wordt de uitwisseling met het grondwater meestal als randvoorwaarde aangenomen. Hetzelfde geldt voor het oppervlaktewatersysteem wanneer de grondwaterstroming gemodelleerd wordt. Over het algemeen is een dergelijke keuze goed te verdedigen. In sommige gevallen echter, waarin het oppervlakte- en grondwatersysteem elkaar wederzijds sterk beïnvloeden, kan het voordelen bieden om een stromingsmodel voor oppervlaktewater en een stromingsmodel voor grondwater gekoppeld door te rekenen. Over dit onderwerp werd eerder gepubliceerd door o.a. Promes (1990) en Ngo (1994).

In dit artikel wordt een methode beschreven om Duflow, een programma voor oppervlaktewaterstroming, en MicroFem, een programma voor grondwaterstroming, aan elkaar te koppelen. De uitkomsten van de beide modellen worden door een koppelingsprogramma op iteratieve wijze met elkaar in overeenstemming gebracht.

Duflow

Duflow is ontwikkeld voor de berekening van stationaire en niet-stationaire stroming van water in een stelsel van kanalen, rivieren, geulen en/of sloten (EDS, 1995; STOWA, 2000). De open waterlopen worden gemodelleerd in een netwerk van knooppunten. Tussen de knooppunten liggen secties, waarvoor de lengte en de weerstand moeten worden opgegeven. Aan het begin en einde van elke sectie dienen de bodemhoogte en de dimensies van het dwarsprofiel te worden gedefinieerd. Met Duflow kunnen ook verschillende soorten kunstwerken worden gemodelleerd, bijvoorbeeld stuwen, duikers en gemalen.

Duflow lost de één-dimensionale, partiële differentiaalvergelijkingen numeriek op voor niet-stationaire stroming in oppervlaktewater. Deze zogenaamde Saint-Venant vergelijkingen bestaan uit de vergelijkingen voor het behoud van massa en voor het behoud van impuls. Om deze vergelijkingen op te kunnen lossen moeten er een aantal randvoorwaarden aan het model worden opgegeven, zoals bijvoorbeeld een bovenstrooms inkomend debiet, een gemeten of vast peil aan de benedenstroomse kant en per sectie initiële waarden voor het waterpeil en het debiet. In Duflow worden het debiet, de gemiddelde stroomsnelheid en de waterhoogte aan het begin en einde van elke sectie

Frank Smits werkt voor ingenieursbureau Witteveen+Bos, Van Twickelostraat 2, postbus 233, 7400 AE Deventer, tel (0570) 69 72 32, f.smits@witbo.nl. Kick Hemker is zelfstandig geohydroloog en verbonden aan de Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam, De Boelelaan 1085-1087, 1081 HV Amsterdam, hemker@microfem.com

berekend. Toevoer naar en afvoer vanuit het netwerk gebeurt in Duflow vanaf de knooppunten.

Aan- of afvoer vanuit het grondwatersysteem naar de gemodelleerde waterlopen wordt als vaste randvoorwaarde opgegeven. In Duflow kan voor een transformatie van neerslag naar afvoer gebruik worden gemaakt van de zogenaamde Regen-Afvoer-Module. Deze module onderscheidt deelprocessen voor open water, verhard en onverhard oppervlak. De gebruikte benadering, waarbij meerdere lineaire reservoirs in serie en parallel worden geschakeld, is sterk empirisch. In de koppeling met MicroFem wordt geen gebruik gemaakt van de Regen-Afvoer-Module, maar wordt de flux naar de secties berekend met MicroFem.

MicroFem

MicroFem is een numeriek rekenprogramma voor stationaire en niet-stationaire grondwaterstroming in de verzadigde zone (Hemker, 1988; Hemker en Nijsten, 1996; Diodato, 2000; Hemker, 2004). MicroFem maakt gebruik van de eindige-elementenmethode. Voor systemen met spanningswater, semi-spanningswater en freatisch water kunnen berekeningen voor grondwaterbeweging, stijghoogten en waterbalansen worden uitgevoerd. Er kunnen watervoerende pakketten met meerdere heterogene en anisotrope lagen worden gemodelleerd, al of niet met tussenliggende slechtdoorlatende lagen.

Binnen MicroFem bestaan diverse mogelijkheden om het topsysteem te schematiseren. Voor de koppeling met Duflow is ervoor gekozen om gebruik te maken van het rivier-topsysteem, omdat deze optie het best aansluit bij de waterlopen zoals ze in Duflow worden gemodelleerd.

Bij het rivier-topsysteem kan drainage of infiltratie optreden (figuur 1). De flux wordt in MicroFem berekend met het verschil tussen de stijghoogte van het grondwater en het peil in het oppervlaktewater en de intree- of uittree-weerstand, zie ook de vergelijkingen (1) tot en met (4).

$$\text{als } h1 > rh1: \quad q_{\text{dr}} = a * (h1 - rh1) / rc1 \quad [\text{m}^3 \text{d}^{-1}] \quad (1)$$

$$\text{als } h1 < rh1: \quad q_{\text{in}} = a * (rh1 - h1) / ri1 \quad [\text{m}^3 \text{d}^{-1}] \quad (2)$$

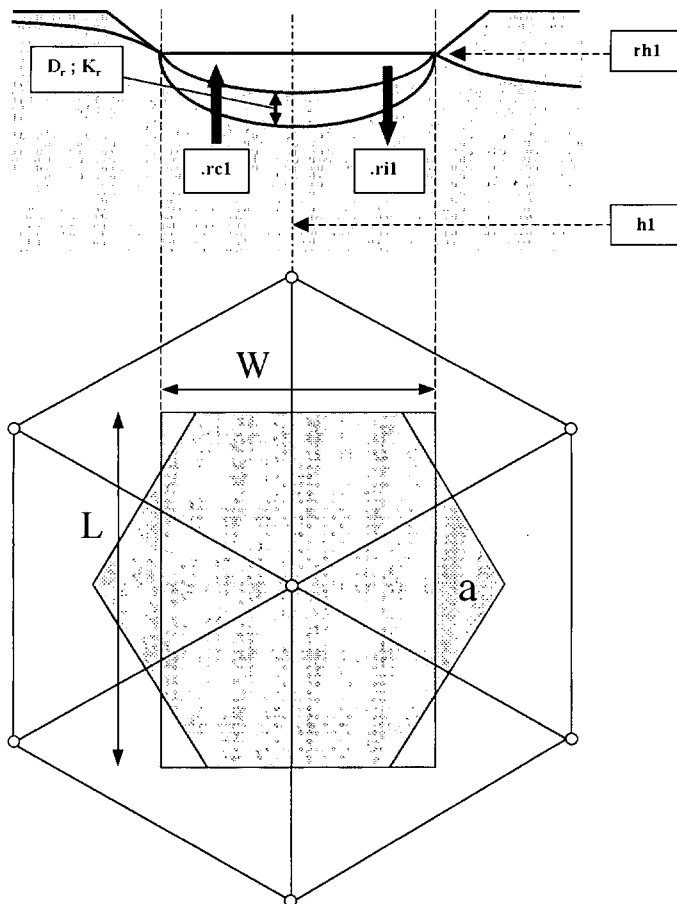
| | | | |
|---------------------|---|--|------------------------------|
| $h1$ | = | stijghoogte van het grondwater in het eerste watervoerende pakket, direct onder de waterloop | [m] |
| $rh1$ | = | opgegeven peil van het oppervlaktewater | [m] |
| $q_{\text{in/out}}$ | = | flux tussen het grondwater- en oppervlaktewater-systeem | $[\text{m}^3 \text{d}^{-1}]$ |
| $rc1$ | = | intreeweerstand (bij drainage) | [d] |
| $ri1$ | = | uittreeweerstand (bij infiltratie) | [d] |
| a | = | invloedsgebied van het knooppunt | $[\text{m}^2]$ |

De weerstanden worden met de vergelijkingen (3) en (4) bepaald.

$$rc1 = (Dr / Krc) * (a / LW) \quad [\text{d}] \quad (3)$$

$$ri1 = (Dr / Kri) * (a / LW) \quad [d] \quad (4)$$

- Dr = dikte van de weerstandslaag onder de waterloop [m]
 Krc & Kri = verticale doorlaatcoëfficiënt van de weerstandslaag [$m d^{-1}$]
 LW = natte oppervlakte van de waterloop per knooppunt [m^2]



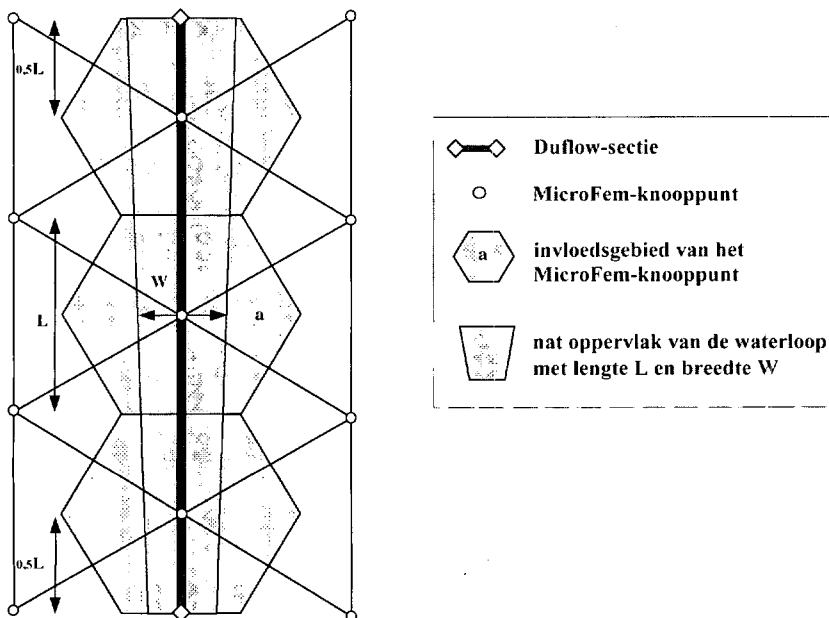
Figuur 1: Infiltratie en drainage met het rivier-topsysteem op één knooppunt in MicroFem.

Voor het rivier-topsysteem dient in MicroFem per knooppunt het peil van het oppervlaktewater, het natte oppervlak van de waterloop, de intree- en de uittree-weerstand te worden opgegeven. In een gekoppelde berekening wordt per gekoppeld knooppunt het peil in het oppervlaktewater en het natte oppervlak van de waterloop berekend met Duflow en doorgegeven aan het grondwatermodel.

Koppeling in de ruimte

Aan elke DufLOW-sectie worden één of meerdere knooppunten van MicroFem gekoppeld. Het aantal knooppunten van MicroFem per sectie is in een gekoppeld model vrij op te geven. Er is voor gekozen om het midden van de DufLOW-secties te koppelen aan de MicroFem knooppunten en niet elk DufLOW-knooppunt te projecteren op een MicroFem-knooppunt, omdat er op de knooppunten van DufLOW een kunstwerk kan zijn gemodelleerd of er meer dan twee secties bij elkaar kunnen komen. In een kunstwerk kunnen er op dezelfde plaats twee of meer verschillende waterhoogten optreden. Bij een overgang van de ene naar de andere sectie kan de dwarsdoorsnede van een waterloop veranderen. Steeds de oppervlakte van twee of meer verschillende halve secties uitrekenen en die vervolgens doorgeven aan een knooppunt in MicroFem is lastiger dan van één deel van een sectie. In het midden van een sectie is er altijd sprake van slechts één waterhoogte en één nat oppervlak van de waterloop.

De knooppunten van MicroFem worden zo regelmatig mogelijk over de secties van DufLOW verdeeld, waarbij de afstand tussen het eerste (en laatste) knooppunt van MicroFem en het begin (en einde) van de sectie de helft is van de afstand tussen de andere bij de sectie behorende knooppunten van MicroFem.



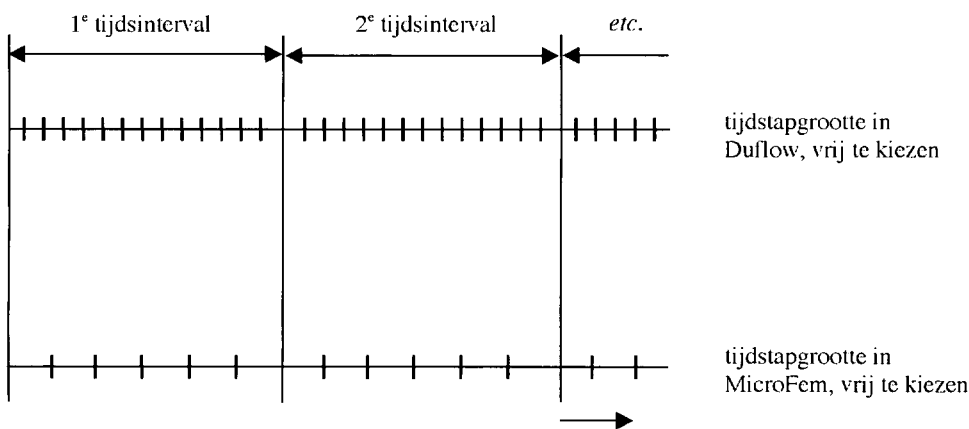
Figuur 2: Koppeling in de ruimte.

Figuur 2 laat een voorbeeld zien van de verdeling van drie gekoppelde knooppunten van MicroFem onder één sectie van DufLOW. Het koppelingsprogramma interpoleert per gekoppeld knooppunt de bodemhoogte van de waterloop en de breedte van het dwarsprofiel.

Koppeling in de tijd

Stroming in open waterlopen en grondwaterstroming verschillen sterk in dynamiek. Grondwater stroomt relatief langzaam en ook de reactie op invloeden van buitenaf is traag in verhouding tot de reactiesnelheid van oppervlaktewater. Dit is van invloed op de te kiezen tijdstap in de beide modellen. In een model voor oppervlaktewaterstroming worden over het algemeen tijdstappen gekozen van één minuut tot enkele minuten, terwijl in een simulatie van grondwaterstroming meestal tijdstappen van één dag tot enkele dagen worden gebruikt.

Er kunnen drie soorten tijdstappen worden onderscheiden; de tijdstappen in Duflow, de tijdstappen in MicroFem en het tijdsinterval waarin de uitkomsten van beide modellen met elkaar in overeenstemming worden gebracht. Eén tijdsinterval bestaat uit één of meerdere tijdstapjes in Duflow en MicroFem en een gekoppelde berekening bestaat op haar beurt uit één of meerdere tijdsintervallen. In deze koppeling is er voor gekozen om tijdstappen in Duflow en MicroFem vrij en onafhankelijk van elkaar te kunnen opgeven. De lengte van het tijdsinterval is ook vrij, maar moet wel een gemeenschappelijk veelvoud zijn van de tijdstappen in Duflow en MicroFem (figuur 3).



Figuur 3: Koppeling in de tijd.

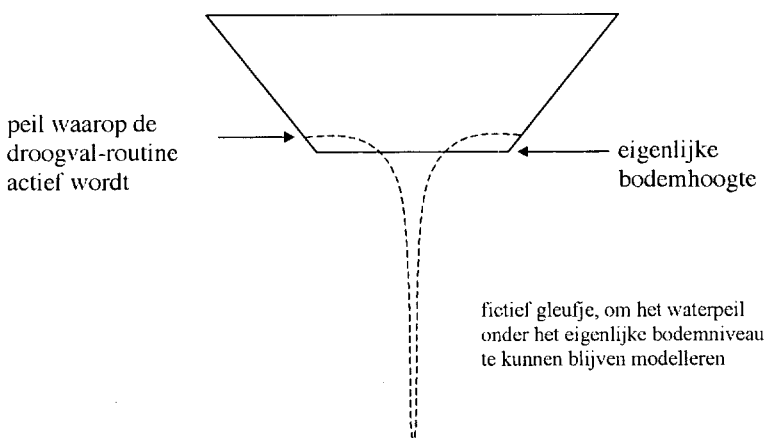
Op deze manier is er een zekere mate van flexibiliteit voor de gebruiker en kunnen de tijdstappen ook worden aangepast aan de te modelleren situatie. Zo kan voor een gekoppelde berekening de tijdstapgrooite voor Duflow op één minuut worden gezet, voor MicroFem op één dag en voor het tijdsinterval waarbinnen de resultaten van Duflow en MicroFem met elkaar in overeenstemming worden gebracht kan ook één dag worden gekozen. Een andere mogelijkheid is bijvoorbeeld respectievelijk één minuut, één uur en zes uur, of tien minuten, zes uur en een halve dag. In de meeste gevallen zal Duflow veel meer tijdstapjes per tijdsinterval nodig hebben dan MicroFem. In het algemeen zal de lengte van het tijdsinterval gelijk worden gekozen aan de tijdstap in MicroFem.

Enkele specifieke kenmerken van het koppelingsprogramma

Droogvallen van een waterloop

Het kan voorkomen dat een sectie in Duflow droogvalt, bijvoorbeeld als de bovenstroomse aanvoer stopt. In Duflow kan niet met een dwarsprofiel zonder water worden gerekend. Om dit probleem op te lossen komt in Duflow bij lage waterstanden in een sectie een droogvalroutine in actie. Deze droogvalroutine modelleert een fictief, dun, diep gleufje onder het eigenlijke dwarsprofiel (figuur 4).

Het gleufje wordt zo geconstrueerd dat het totaal doorstroomde oppervlak van het dwarsprofiel hetzelfde blijft en vrijwel geen invloed heeft op de berekeningen. Mocht het waterpeil onder het eigenlijke bodemniveau komen, dan blijft er in het model wel enig water in de waterloop staan en loopt Duflow niet vast, maar omdat het doorstroomd oppervlak klein is, blijft de totale hoeveelheid water die door het gleufje kan stromen ook gering. De fout in de waterbalans die op deze manier gemaakt wordt, is niet groot en weegt zeker op tegen het voordeel dat ook droogvallende waterlopen gemodelleerd kunnen worden.



Figuur 4: Schematische weergave van een dwarsprofiel met de droogvalroutine in Duflow.

Bij een gekoppelde berekening moet met deze droogvalprocedure in Duflow rekening worden gehouden. Het koppelingsprogramma houdt bij of de gemiddelde gemodelleerde waterhoogte in Duflow onder het eigenlijke bodemniveau komt. Mocht dit het geval zijn, dan wordt de uittree-weerstand ($ri1$) voor dit gekoppelde knooppunt in MicroFem oneindig groot gemaakt. Er kan dan geen water meer van het oppervlaktewatersysteem naar het grondwatersysteem stromen. De intree-weerstand ($rc1$) wordt wel gewoon uitgerekend; er kan in het geval van droogvallen van de waterloop wel water van het grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem stromen.

Maximale infiltratie

Als het peil van het grondwater diep wegzakt, dan wordt het verschil tussen het peil van het oppervlaktewater en de stijghoogte van het grondwater (h_1-h_2) en daarmee de infiltratie vanuit het oppervlaktewater erg groot, zie ook vergelijking (2). Het kan zelfs voorkomen dat de grondwaterspiegel los raakt van het oppervlaktewater, zodat er sprake is van een onverzadigde zone tussen het oppervlaktewater en het grondwater. De doorlatendheid van deze zone wordt daardoor veel minder, zodat de infiltratie geringer is dan met vergelijking (2) wordt berekend.

In de praktijk blijkt dat de flux vanuit de waterloop naar het grondwater bij steeds groter wordende peilverschillen niet meer evenredig toeneemt met het peilverschil, maar op een gegeven moment een vrijwel constante, maximum waarde bereikt. In een gekoppelde berekening is het mogelijk om deze infiltratiecapaciteit per gekoppeld knooppunt van MicroFem op te geven. Het koppelingsprogramma zorgt ervoor dat deze waarde niet wordt overschreden.

Opgeven van afwaterende gebieden

In het algemeen zullen alleen de belangrijkste watergangen in het DufLOW-model worden opgenomen. De minder belangrijke watergangen worden in het oppervlaktewatermodel verwaarloosd, maar kunnen wel in het grondwatermodel als topsysteem worden opgenomen. Dit wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Voor polder 'de Zeevang' wordt alleen het stroompje d' IJe in het DufLOW-model opgenomen en alle andere watergangen in dit gebied worden in MicroFem als drainage-systeem gemodelleerd (figuur 5). Deze kleinere watergangen wateren in werkelijkheid echter wel af op d' IJe, terwijl in een gekoppelde berekening dit water alleen als flux door MicroFem uit het grondwatersysteem zou verdwijnen, maar niet in d' IJe terecht komt. De flux naar en de waterbalans van het oppervlaktewatermodel kloppen in een dergelijk geval niet meer.

In MicroFem kunnen knooppunten worden gegroepeerd met een label. Het koppelingsprogramma maakt hiervan gebruik door de flux vanuit het topsysteem voor alle knooppunten met hetzelfde label aan één knooppunt in DufLOW toe te wijzen, zodat de waterbalans tussen DufLOW en MicroFem ook in deze situaties sluitend is. Op deze manier kunnen binnen het MicroFem-model verschillende afwaterende gebieden met een eigen label aan bepaalde knooppunten van het DufLOW-model worden gehangen, zodat ook gekoppelde modellen op regionaal niveau gemaakt kunnen worden.

De wijze van schematiseren in afwaterende gebieden lijkt op het toepassen van de Regen-Afvoer-Module in DufLOW, maar in plaats van dit empirische reservoirmodel wordt het fysisch-gebaseerde grondwatermodel ingezet. De snelle afvoercomponent bij grote hoeveelheden neerslag in bijvoorbeeld stedelijk gebied kan in een gekoppelde berekening mogelijk te traag tot afvoer komen. In dat geval zou de Regen-Afvoer-Module kunnen worden bijgeschakeld voor het stedelijke gebied. Dit is nog onderwerp van verdere studie.



Figuur 5: Voorbeeld van het koppelen van afwaterende gebieden aan knooppunten van Duflow.

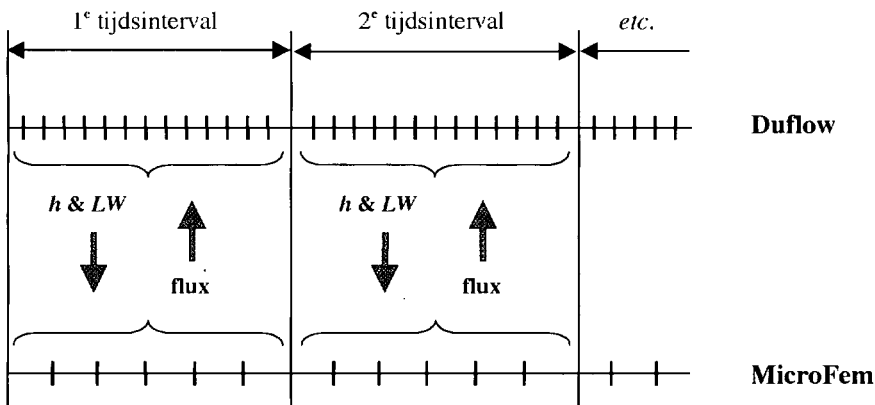
Opzetten van een gekoppelde berekening

In de initialisatie-fase wordt met behulp van een aantal routines en MicroFem een eendige elementennetwerk van MicroFem als het ware passend onder een bestaand Duflow-model gehangen. Er wordt automatisch een MicroFem-netwerk gegenereerd op basis van de layout van het Duflow-netwerk. In een zogenaamd koppelbestand komen alle benodigde gegevens voor de koppeling te staan, te weten: de dimensies van de profielen, de hoogten en lengten van de verschillende secties in Duflow, de x- en y-coördinaten van de knooppunten in Duflow en MicroFem, de Duflow-sectienummers met de bijhorende gekoppelde MicroFem-knooppunten, de intree- en uittree-weerstanden per sectie en het invloedsoppervlak per MicroFem-knooppunt. De gegevens in dit koppelbestand worden tijdens de gekoppelde berekening gebruikt om de bij elkaar horende uitkomsten en invoer in de bestanden van Duflow en MicroFem op te zoeken en weg te schrijven.

Uitvoeren van een gekoppelde berekening

Als de schematisaties van beide modellen ingevoerd zijn en de modellen van randvoorwaarden zijn voorzien, dan zijn ze klaar voor een gekoppelde berekening. Het koppelingsprogramma wordt aangestuurd met een batch-bestand bestaande uit een serie commando's.

Het eigenlijke koppelingsprogramma start steeds óf DufLOW, óf MicroFem en leest en schrijft tussen de berekeningen van deze beide programma's de resultaten in het juiste formaat heen en weer van de uitvoer- naar de invoer-bestanden van de beide programma's. DufLOW en MicroFem rekenen verder zelfstandig en ook de in- en uitvoer is niet anders dan bij een ongekoppelde berekening.



Figuur 6: Koppeling in de tijd met de parameters, peil (h) en natte oppervlak (LW) in DufLOW en de flux tussen de twee systemen van MicroFem, die per tijdsinterval door middel van iteratie met elkaar in overeenstemming worden gebracht.

Het koppelingsprogramma rekent het eerste tijdsinterval met het DufLOW-model door, waarbij er geen flux van of naar het grondwater wordt gemodelleerd. De gemiddelde, gemodelleerde waterhoogte wordt per gekoppeld knooppunt overgebracht als randvoorwaarde naar MicroFem. Niet alleen de waterhoogte wordt overgebracht, maar ook het natte oppervlak (LW) dat bij deze gemiddelde waterhoogte hoort. Vervolgens rekent MicroFem met deze gemiddelde waterhoogten en natte oppervlakken voor hetzelfde eerste tijdsinterval het grondwatersysteem door. Als de berekening van het eerste tijdsinterval klaar is, dan wordt de met MicroFem uitgerekende gemiddelde flux naar of van het oppervlaktewater als randvoorwaarde aan het DufLOW-model opgegeven. Vervolgens rekent DufLOW weer hetzelfde eerste tijdsinterval door, wordt de gemiddelde waterhoogte en natte oppervlak aan MicroFem als randvoorwaarde doorgegeven, rekent MicroFem weer hiermee het grondwatersysteem door etcetera. Dit iteratieproces wordt net zolang herhaald totdat de beide uitkomsten voldoende met elkaar in overeenstemming zijn gebracht (figuur 6). Hierna wordt op dezelfde wijze verder gegaan met het volgende tijdsinterval. De gekoppelde berekening wordt voortgezet totdat alle tijdsintervallen zijn doorgerekend.

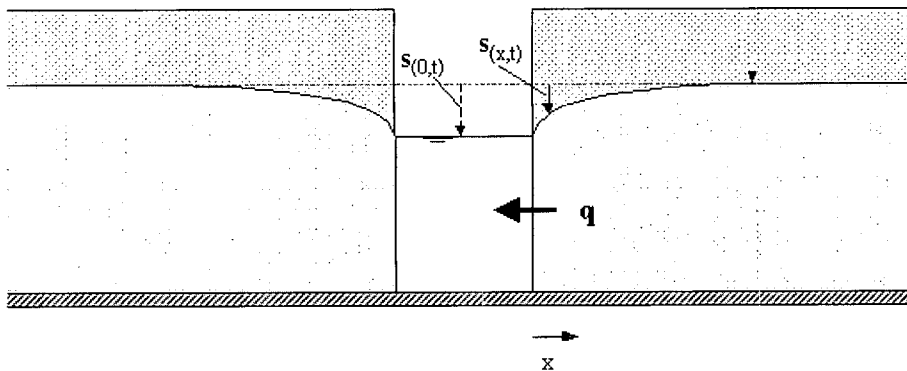
Het aantal iteraties dat per tijdsinterval nodig is hangt af van de gewenste nauwkeurigheid van de berekening en van de te modelleren situatie. Bij een lage weerstand tussen de beide systemen en grote peilfluctuaties in het oppervlaktewater zijn er meer iteraties nodig dan in een situatie met een hoge weerstand en weinig schommelingen in het oppervlaktewaterpeil. De nauwkeurigheid is, samen met het minimum en maximum aantal iteraties per tijdsinterval, door de gebruiker op te geven.

Verificatie

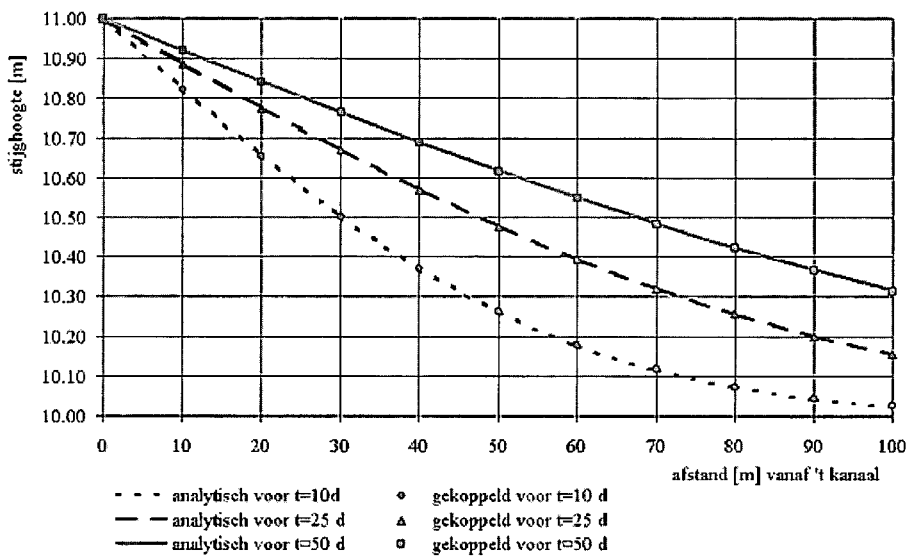
Er zijn een aantal eenvoudige gekoppelde modellen gemaakt, waarvan de randvoorwaarden zodanig zijn gekozen dat de uitkomsten logischerwijs, of op analytische wijze op voorhand bekend zijn. De eerste testmodellen betreffen een volledig ingesneden kanaal. In de Ridder en Zijlstra (1994) worden voor verschillende regimes van het kanaalpeil analytische oplossingen beschreven voor de flux tussen het kanaal en het aangrenzende grondwatersysteem en voor het stijghoogteverloop als functie van de afstand tot het kanaal. Als beginvoorwaarde is het kanaalpeil gelijk gesteld aan de stijghoogte in het grondwatersysteem. Voor het kanaalpeil zijn in hetzelfde gekoppelde model, steeds met andere rekenstapgroottes en tijdsintervallen, de volgende peilverlopen doorgerekend:

- geen peilverandering;
- plotselinge peilverlaging;
- plotseling peilverhoging;
- lineaire peilverlaging;
- lineaire peilverhoging;
- harmonische peilvariatie.

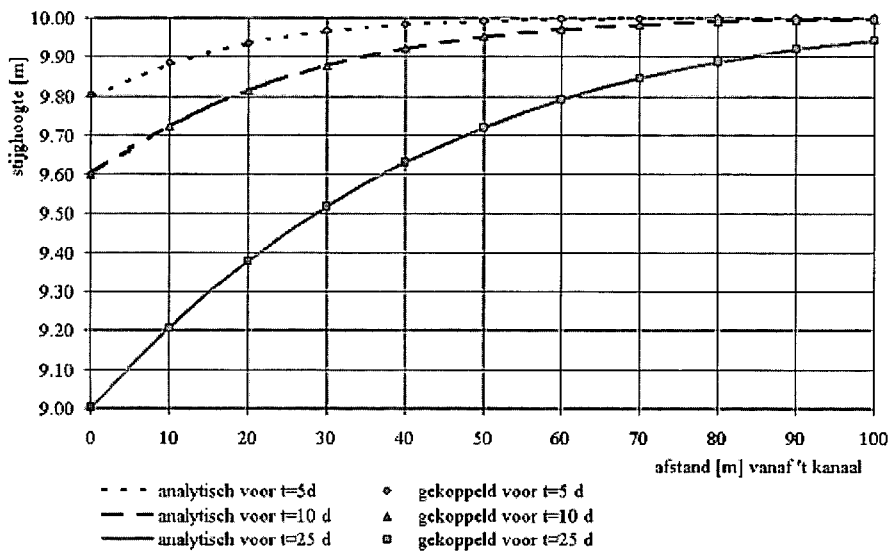
Als voorbeeld is in figuur 7 de test met de lineaire peilverlaging getekend, waarbij q de flux is tussen het kanaal en het grondwatersysteem, $s(0,t)$ het peilverloop in het kanaal en $s(x,t)$ het verloop van de stijghoogte op afstand x van het kanaal.



Figuur 7: Lineaire peilverlaging in het kanaal.



Figuur 8: Analytisch en numeriek berekende stijghoogten na een plotselinge peilverhoging in het kanaal van 10 naar 11 meter.



Figuur 9: Analytisch en numeriek berekende stijghoogten na een lineaire peilverlaging in het kanaal van 10 naar 9 meter in 25 dagen.

Als voorbeeld zijn in figuur 8 en 9 voor de plotselinge peilverhoging en de lineaire peilverlaging de analytisch en gekoppeld berekende stijghoogten als functie van de afstand tot het kanaal voor drie verschillende tijdstippen tegen elkaar uitgezet. De uitkomsten van de gekoppelde berekeningen komen goed overeen met de analytische oplossingen. Hetzelfde geldt voor de uitkomsten van de andere testmodellen.

Het koppelingsprogramma is vervolgens getest voor andere eenvoudige stromingsproblemen:

- droogvallende waterloop;
- geïsoleerd meer met alleen een flux van en naar het grondwatersysteem;
- poldersysteem met kwel en neerslag;
- afwaterende oppervlakken.

Tenslotte is ook een model opgezet van een uiterwaard met een plas die alleen via het grondwatersysteem in verbinding staat met de rivier. Zowel de rivier als de plas is in Duflow gemodelleerd. Met het gekoppelde model is de reactie van het plaspeil op een hoogwatergolf op de rivier onderzocht en vergeleken met analytische oplossingen volgens Ramaker (1998).

Met behulp van de hierboven beschreven modellen is de werking van het koppelingsprogramma getest, verbeterd en uiteindelijk geverifieerd. Het koppelingsprogramma genereert voor alle eenvoudige modellen logische resultaten. De fluxen tussen de gekoppelde Duflow- en MicroFem-modellen worden juist berekend en hetzelfde geldt voor de beide modellen voor respectievelijk de peilen en de stijghoogten.

Toepassingen

Gekoppelde berekeningen tussen Duflow en MicroFem hebben, ten opzichte van berekeningen met de afzonderlijke modellen, een meerwaarde in situaties waarbij er een significante wederzijdse beïnvloeding tussen het oppervlaktewater- en het grondwatersysteem bestaat.

Een voorbeeld daarvan is een in een freatisch zandpakket vrij-afwaterende beek, die moet worden verlegd, verondiept of uitgebreid. Een Duflow-model met alleen de Regen-Afvoer-Module kan dan onvoldoende houvast bieden voor de te verwachten afvoer in de tijd en de benodigde hydraulische dimensionering van de beek. De invloed van het aanpassen van de beek op het grondwatersysteem in de omgeving en de toekomstige interactie tussen beide systemen kan met een gekoppeld model beter worden ingeschat.

Ook bij het modelleren van situaties waarbij men met het oppervlaktewater het grondwaterpeil probeert te sturen of waarbij de werking van het drainagesysteem tot op greppelniveau wordt onderzocht, kan een gekoppelde berekening te verkiezen zijn boven de gebruikelijke manier van werken.

Tijdens het afstudeeronderzoek waarbij de huidige koppeling werd ontwikkeld (Smits, 2002) is een begin gemaakt met het gekoppeld modelleren van een infiltratiesysteem rondom het pompstation 't Klooster bij Hengelo in Gelderland. Deze grondwaterwinning vindt plaats in het freatisch pakket. Watergangen rondom de winputten worden gebruikt om water uit een nabijgelegen beek (de Veengoot) te infiltreren, om

negatieve gevolgen van de onttrekking gedeeltelijk te compenseren. Omdat tijdens de zomermaanden soms geen water uit de Veengoot kan worden aangevoerd, vallen de watergangen periodiek droog. Verder heeft een gedeelte van de watergangen gedurende de wintermaanden een drainerende werking: Allerlei lastige situaties die een koppelingsprogramma aan moet kunnen, komen in dit gebied voor. Er is sprake van infiltratie, droogvallen en drainage, die zowel in de ruimte als in de tijd variëren. Het gekoppelde model is succesvol getest op zowel een sluitende waterbalans als juiste berekende peilen en stijghoogten. De eerste resultaten van dit gekoppelde regionale model met gemeten waarden als randvoorwaarden lijken veelbelovend. In een volgend artikel in *Stromingen* zal hier nader op worden ingegaan.

Iteratieve koppelingen tussen meerdere modellen zijn over het algemeen rekenintensief. Deze koppeling is daarop geen uitzondering en de tijd voor een gekoppelde berekening met een regionaal MicroFem-model waarbij een flink aantal watergangen in DufLOW zijn geschematiseerd wordt eerder uitgedrukt in uren dan in minuten. Omdat de tijdsintervallen waarover de uitkomsten met elkaar in overeenstemming worden gebracht, de nauwkeurigheid en het maximaal aantal iteraties per tijdsinterval vrij zijn te kiezen, heeft de gebruiker wel enige invloed op de tijdsduur van de berekening.

De werking en toepassing van het koppelingsprogramma is uitgebreid beschreven in het afstudeerverslag (Smits, 2002). Een hydroloog die ervaring heeft met zowel DufLOW als MicroFem moet met behulp van het verslag een gekoppelde berekening op kunnen zetten. Omdat de koppeling in Turbo Pascal is geprogrammeerd is er echter geen sprake van een Windows-gebruikers-schil rondom de beide programma's. Geïnteresseerde lezers kunnen een digitale versie van het afstudeerverslag opvragen bij de eerste auteur.

Conclusies

Een gekoppelde berekening van een stromingsmodel voor oppervlaktewater en een stromingsmodel voor grondwater is vooral op zijn plaats als er veel interactie is tussen beide en er moeilijk randvoorwaarden kunnen worden aangenomen voor één van de twee systemen.

Met behulp van het koppelingsprogramma kunnen de uitkomsten van een DufLOW- en een MicroFem-model op iteratieve wijze met elkaar in overeenstemming worden gebracht. Dit betekent dat de door MicroFem berekende fluxen van en naar het oppervlaktewater door DufLOW als randvoorwaarde worden gebruikt, terwijl voor hetzelfde tijdsinterval de door DufLOW berekende oppervlaktewaterpeilen en natte oppervlakken bij de MicroFem-berekening worden gebruikt.

De koppeling komt tot stand via het rivier-topsysteem in MicroFem. Per sectie van DufLOW kan een willekeurig aantal knooppunten van MicroFem worden gekoppeld. Het koppelingsprogramma interpoleert per gekoppeld MicroFem-knooppunt de bodemhoogte en de breedte van de waterloop.

De mogelijkheid om de rekenstapgrootte van beide modellen, de lengte van het tijdsinterval en de gewenste nauwkeurigheid vrij te kunnen kiezen blijkt in de praktijk een voordeel te zijn bij gekoppeld rekenen. Hetzelfde geldt voor het feit dat rekening wordt gehouden met het droogvallen van de open waterlopen, de maximale infiltratiecapaciteit

en de mogelijkheid om afwaterende oppervlakken te kunnen opgeven. Door de laatstgenoemde optie kunnen ook regionale modellen gekoppeld worden doorgerekend.

Het koppelingsprogramma is uitvoerig getest en geverifieerd met eenvoudige stromingsproblemen. Vervolgens is een gekoppeld regionaal model gemaakt van een bestaande situatie van een complex infiltratie-systeem rondom een grondwaterwinning. Ook met een dergelijk groot gekoppeld model laat het programma zowel voor de waterbalans als de berekende peilen en stijghoogten logische resultaten zien.

Literatuur

- Diodato, D.M. (2000)** Software Spotlight: MicroFEM version 3.50; in: *Ground Water*, vol 38, nr 5, pag 649–650.
- EDS (1995)** Handleiding voor Duflow versie 2.04; Leidschendam.
- Hemker, C.J. (1988)** Eindige elementen in opmars in hydrologische modellen; in: *H₂O*, jrg 21, pag 611–615.
- Hemker, C.J. en G.J. Nijsten (1996)** Groundwater Flow Modeling using MicroFem: Manual Version 3; Hemker Geohydroloog Amsterdam.
- Hemker, C.J. (2004)** MicroFEM Development & Support; Internet site: <http://www.microfem.com>.
- Massop, H.Th.L., L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, J.M.M. Bouwmans en H. Prak (1997)** Invloed van de oppervlaktewaterstand op de grondwaterstand; SC-DLO, rapport 527.1, Wageningen.
- Ngo, X.T. (1994)** Koppeling tussen grondwatermodel en oppervlaktewatermodel Moduflow; afstudeerverslag, Faculteit der Civiele Techniek TU Delft, Waterleiding Maatschappij Overijssel N.V..
- Promes, P.M. (1990)** De problematiek van de koppeling van grondwater- en openwatermodellen; vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, Landbouwuniversiteit Wageningen.
- Ramaker, C. (1998)** Plassen in uiterwaarden: gevoed door kwel uit de rivier? Respons van het grondwater in uiterwaarden op een hoogwaterpuls in de rivier; afstudeerverslag, Technische Universiteit Delft / RIZA, RIZA rapport nummer 98.040.
- Ridder, N.A. de en G. Zijlstra (1994)** Seepage and Groundwater Flow; hoofdstuk 9 in H.P. Ritzema e.a. (red) *Drainage Principles and Applications*; ILRI publication 16, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen 2^e druk.
- Smits, F.J.C. (2002)** Koppeling Duflow-MicroFem; afstudeerverslag, vakgroep Hydrologie, Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam.
- STOWA (2000)** Duflow for Windows V3.3, -Users Guide Duflow Modelling Studio, -Reference Guide Duflow, -Reference Guide RAM; Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, Utrecht, publicatie 2000-27.

Dit artikel is tot stand gekomen naar aanleiding van een afstudeeronderzoek aan de Vrije Universiteit.