

---

# Het grondwatermodel als civieltechnisch gereedschap

C.J. Hemker  
G.J.M. Janssen

---

## *Inleiding*

*Bij problemen die met de stroming van grondwater te maken hebben worden steeds vaker numerieke modellen gebruikt. Vroeger was dit een bezigheid voor specialisten, maar tegenwoordig zijn er diverse computerprogramma's waarmee vrij eenvoudig en snel de verschillende aspecten van een bepaald stromingsprobleem kunnen worden geanalyseerd. Het maken van computermodellen is routine geworden voor veel hydrogeologen. Het betreft vaak regionale modellen, die bij grote en langlopende projecten worden gebruikt, zoals bijvoorbeeld winplaatsonderzoeken van waterleidingbedrijven. Naarmate het gemak waarmee computers kunnen worden ingezet toeneemt, worden computermodellen steeds vaker gebruikt voor de berekening van hydrologische effecten op kleinere schaal, zoals bijvoorbeeld bij de bemaling van bouwputten en andere tijdelijke ontgravingen, maar ook zandwinputten, stortplaatsen, grondwatersaneringen, stedelijke hydrologie en dergelijke civiel-technische ingrepen. Deze berekeningen werden van oudsher uitgevoerd met analytische formules, maar langzamerhand winnen de numerieke modelleringen met behulp van eindige-differentie- en/of eindige-elementen-technieken steeds meer terrein. Eindige-elementen-modellen zijn breder inzetbaar dan eindige-differentie-modellen en in Nederland is vooral met eindige-elementen-modellen de laatste tien jaar veel ervaring opgedaan. Qua algemene opzet onderscheidt een modellering voor een lokale civieltechnische toepassing zich niet wezenlijk van de meer regionale modelleringen. Door het schaalverschil dat zich manifesteert in de beperkte grootte van het interessegebied, de verdeling en de aard van de beschikbare gegevens, en de invloed van lokale heterogeniteiten binnen het invloedsgebied, hebben deze lokale modellen echter hun eigen problematiek en aanpak.*

## **Analytische en numerieke modellen**

Hoewel in de praktijk ervaring heel belangrijk is, dienen er voorafgaande aan een civieltechnische ingreep berekeningen te worden uitgevoerd. De berekeningen zijn nodig voor het ontwerp van de geplande ingreep en om verschillende scenario's te kunnen vergelijken. De resultaten van het grondwatermodel kunnen bijvoorbeeld als basis voor schadeberekeningen dienen. Bij geohydrologische berekeningen is men in het algemeen geïnteresseerd in:

- geschikte locaties en benodigde capaciteiten van pomp- en/of injectieputten;

---

**C.J. Hemker** is werkzaam bij de Faculteit der Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, e-mail: hemk@geo.vu.nl. **G.J.M. Janssen** is werkzaam bij Fugro Ingenieursbureau b.v. te Leidschendam, e-mail: jan@fugro.nl.

- de grootte van invloedsgebieden en de te verwachten grondwaterstands- en stijghoogteveranderingen;
- het optreden van tijdseffecten, vooral bij freatische pakketten;
- stroomsnelheden, stroombanen en verplaatsing van verontreinigingen.

Analytische modellen, d.w.z. wiskundige beschrijvingen van de grondwaterstroming voor een bepaalde situatie met behulp van exacte formules, hebben als belangrijkste nadeel dat ze alleen beschikbaar zijn (of ontwikkeld kunnen worden) voor situaties waarin de ondergrond sterk is geschematiseerd. Bijna altijd zijn deze schematisaties beperkt tot één watervoerend pakket, homogene en isotrope oneindig ver uitgestrekte lagen, en met een rechte damwand, ronde bouwput of iets dergelijks. Bovendien wordt slechts één oorzaak van stroming tegelijk berekend, zodat altijd in superpositie moet worden gewerkt. Door de vele aannamen mogen de analytisch berekende resultaten in veel gevallen slechts als een globale indicatie van de mogelijke effecten van een ingreep worden gezien. Voor ingewikkelder situaties en voor nauwkeurige berekeningen zijn ze in het algemeen niet geschikt. Bovendien zijn analytische resultaten voor niet-stationaire (dynamische) problemen meestal niet eenvoudig te berekenen, omdat gebruik moet worden gemaakt van waarden die in tabellen of grafieken moeten worden opgezocht.

Numerieke modellen (zowel eindige-differentie- als eindige-elementen-) hebben al deze beperkingen niet en ze kunnen daarom nuttig worden ingezet bij ingewikkelder problemen. Ook deze numerieke technieken hebben uiteraard hun beperkingen, maar die liggen meer bij de complexere problemen, zoals die kunnen voorkomen bij dichtheidsstroming en in gekoppelde verzadigde-onverzadigde stromingsmodellen. De nauwkeurigheid van de resultaten van numerieke modellen wordt voornamelijk bepaald door de onzekerheid over de hydraulische eigenschappen van de ondergrond. De eindige-differentie- en eindige-elementen-technieken zijn beide gebaseerd op een oplossingsmethode waarbij waterbalansvergelijkingen worden opgesteld voor een groot aantal kleine gebiedjes waarin het gehele modelgebied is opgedeeld. Eén van de taken bij het numeriek modelleren is daarom de (ruimtelijke) discretisatie van het modelgebied ofwel, het opdelen van het modelgebied in cellen of elementen. In die gebieden waar veel informatie over de ondergrond bekend is en daar waar de grondwaterstroming sterk varieert of nauwkeurig moet worden berekend, worden de cellen of elementen naar verhouding klein gekozen. De wiskundige achtergrond van beide methoden is verschillend, maar voor de modelleur uit zich dit verschil voornamelijk in de manier van discretiseren van het modelgebied. Eindige-differentie-modellen zijn bijna altijd gebaseerd op een eenvoudig patroon van rechthoekige cellen, dat ontstaat door een rechthoekig modelgebied met series lijnen evenwijdig aan de zijden te verdelen (programma Modflow). Bij eindige elementen modellen bestaat een veel grotere vrijheid om op basis van de geologie, de topografie en de grondwaterstroming een geschikte ruimtelijke indeling te maken. Dit komt omdat (meestal) gebruik gemaakt wordt van onregelmatige driehoeken, zoals bij de programma's MicroFem en Triwaco.

Eindige-elementen-modellen kunnen onregelmatige vormen hebben, zodat de modelranden langs geschikte grenzen kunnen worden gekozen: geologisch (bijvoorbeeld breuken, grenzen van aquifers) en hydrologisch (bijvoorbeeld stroomlijnen, waterscheidingen, isohypsen). Met het onregelmatige driehoeken-netwerk kunnen ook allerlei vormen die voor de modellering van belang zijn in het model worden ingevoerd (oeveren van rivieren, grenzen van kleilagen,

vormen van damwanden, et cetera), terwijl ook de locatie van pompputten en peilbuizen precies met die van de knooppunten kan overeenkomen. Bij de eindige-elementen-methode hebben verfijningen in het centrale deel van het modelgebied geen effect op de grootte van de elementen langs de randen van het model. Voor het ontwerpen van een onregelmatig elementen-netwerk is het wel wenselijk om een netwerkgenerator te gebruiken waarmee met een minimum aan invoergegevens een netwerk kan worden gemaakt dat aan alle eisen voldoet. Voor de numerieke nauwkeurigheid van de berekening is het van belang dat een overgang van grote naar kleine elementen geleidelijk verloopt, zodat geen driehoeken ontstaan met zeer scherpe en stompe hoeken.

## **Civieltechnisch modelleren**

De eigenschappen en bijzonderheden van elk numeriek model zijn uiteraard afhankelijk van de gemodelleerde ingreep en van de geologische en hydrologische omstandigheden. De gebruikelijke schaal en detaillering bij civieltechnische modelleringen zorgen in het algemeen echter voor een verschillende aanpak bij de afzonderlijke stappen voor het maken van een model. Zonder volledigheid te willen nastreven, zal een aantal van deze verschillen worden toegelicht.

De schaal van de ingreep is vaak in de orde van enkele tientallen tot enkele honderden meters (bij bemalingen, bouwputten, afgravingen, vuilstorten en dergelijke). Omdat bovendien de ingreep meestal aan het maaiveld en nabij de grondwaterspiegel plaatsvindt en ook omdat veel bemalingen van tijdelijke aard zijn, blijft de schaal waarop er belangrijke veranderingen in de grondwaterstroming optreden eveneens beperkt. Enerzijds is dat gunstig, het te modelleren gebied hoeft niet al te groot te zijn, maar anderzijds kan het ook ongunstig zijn omdat de kleinere systeemschaal tot gevolg heeft dat alle informatie op een kleine schaal van belang kan zijn. Voor de schematisatie van de ondergrond betekent dit dat gedetailleerde informatie over (de variatie van) de hydraulische eigenschappen van de goed- en slechtdoorlatende lagen van betekenis kan zijn. Zo kan een goede kartering van het voorkomen, dan wel ontbreken, van (dunne) slechtdoorlatende lagen in hoge mate bepalend zijn voor de berekende grondwaterstroming. Ook kleine hydrologische objecten zullen dan in een goede modellering een rol spelen; niet alleen greppels, sloten en drainbuizen, maar bijvoorbeeld ook funderingen en lekke riolen. Het voordeel van de eindige elementen methode is in dit verband dat lithologische grenzen (het lokaal voorkomen van klei- en veenlagen, zandbanen, ophooglagen) en de ligging van zaken die voor de grondwaterstroming van belang zijn (bijvoorbeeld oevers, dijken, polders, sloten, drains, damwanden en putten) met grote precisie in het model kunnen worden ingevoerd. In het algemeen vereist dit kleine elementen in het gehele interessegebied.

De kleine systeemschaal heeft ook consequenties voor de geohydrologische schematisatie. Een ondoorlatende basis kan in het algemeen bij een regionale kleilaag op enkele tientallen meters diepte worden gekozen, maar de indeling in watervoerende en slechtdoorlatende lagen, ook als die lagen slechts in een beperkt deel van het model in de omgeving van de ingreep voorkomen, dient voldoende gedetailleerd te zijn. Ook onvolkomen putten, onvolkomen damwanden en horizontale drains kunnen door een juiste verticale discretisatie nauwkeurig worden gemodelleerd met een numeriek model. De Dupuit benadering of

quasi-3D benadering, zoals die in analytische modellen meestal wordt gebruikt, hoeft in numerieke 3D-modellen geen beperking te vormen, omdat elke laag in een aantal sublagen kan worden opgedeeld.

Het modelgebied kan bij een civieltechnische modellering kleiner zijn dan bij regionale modelleringen omdat het interessegebied kleiner is en omdat bij tijdelijke ingrepen de afstand tussen het interessegebied en de modelrand soms kleiner kan worden gekozen. Dat betekent in het algemeen niet dat voor een civieltechnisch probleem slechts een relatief klein gebied hoeft te worden gemodelleerd. De afstand tussen de ingreep en de modelrand wordt voornamelijk door de globale hydraulische eigenschappen van het gebied bepaald. Tot op welke afstand kunnen grondwaterstandsveranderingen en stijghoogteveranderingen worden verwacht? Is het een pakket met spanningswater of een freatisch pakket? Wat is de orde van grootte van de doorlaatvermogens (kD-waarden) en verticale weerstanden (c-waarden)? Voor alle zekerheid kan de modelgrens beter aan de ruime kant worden gekozen. Bij een eindige elementen model is dat geen bezwaar omdat alle elementen bij de rand relatief groot kunnen zijn, blijven de nadelen (meer rekenwerk, grotere bestanden) namelijk beperkt. Bij twijfel kan met een analytisch of numeriek hulpmodel een veilige afstand worden berekend. In sommige gevallen kan het een goede keuze zijn om een vierzijdig model te maken, waarbij bovenstrooms en benedenstroom een isohypse als vaste-stijghoogte-grens, en voor de overige twee randen stroomlijnen als een dichte grens worden aangenomen.

Bij niet-stationaire modelleringen moeten stress-perioden en tijdstappen op de gebruikelijke manier worden gekozen. Door de kleinere ruimte- en tijdschaal van civieltechnische modellen kan het belangrijk zijn ook aan kort durende variaties van de randvoorwaarden te denken, bijvoorbeeld korte perioden met veel neerslag of hoge rivierpeilen.

Voor de benodigde detaillering in het interessegebied van het model moet gebruik worden gemaakt van alle beschikbare gegevens over de ondergrond op en rond de locatie. De regionaal bekende (hydro-)geologische informatie (rapporten en kaarten) wordt aangevuld met lokale informatie van boringen, sonderingen en andere veldmetingen. Ook de hydrologische situatie wordt onderzocht aan de hand van beschikbare regionale gegevens, aangevuld met lokaal gemeten grondwaterstanden en stijghoogtes. Naarmate er meer ruimtelijke en temporele variaties van grondwaterstanden en stijghoogtes worden gemeten, is het zinvoller om een model te maken en te kalibreren voor de situatie voorafgaande aan de ingreep. Op deze manier wordt niet alleen de oorspronkelijke situatie beschreven, maar er ontstaat zo een beter inzicht in de lokale hydrologie, terwijl meer informatie uit de beschikbare veldmetingen kan worden gehaald om tot een betrouwbaar stromingsmodel te komen.

Kalibratie op basis van de 'natuurlijke' grondwaterstroming zal altijd tot een beter model leiden en zo de nauwkeurigheid van de te berekenen effecten van de ingreep vergroten. Hierbij moet de voorkeur worden gegeven aan het gebruik van computerprogramma's voor automatische kalibratie (parameteroptimalisatie), omdat dan betere informatie over de nauwkeurigheid van de berekende parameters wordt verkregen (Hemker, 1997). Dat kan bijvoorbeeld van belang zijn wanneer in een gebied geen onttrekkingen/injecties voorkomen en ook kwel en infiltratie (neerslagoverschot) weinig bijdragen aan de totale waterbalans. In een dergelijk geval zal de grondwaterstroming voornamelijk worden bepaald door de

gebruikte vaste stijghoogten op de modelranden en zullen de stijghoogten maar weinig afhankelijk zijn van de  $kD$ - en  $c$ -waarden. Indien als gevolg van een ingreep de verticale en horizontale stromingscomponenten in het interessegebied toenemen, worden vooral de lokale grondconstanten bepalend voor de berekende effecten. Met veldmetingen tijdens de ingreep kan dan een beter gekalibreerd model worden gemaakt. In alle gevallen waarbij essentiële informatie over de hydraulische eigenschappen ontbreekt dienen pompproeven te worden uitgevoerd, waarna de verlagingen met het numerieke model kunnen worden geanalyseerd.

Bij de toepassing van het model kan, afhankelijk van de gewenste resultaten, met een superpositiemodel worden gewerkt of een toekomstige situatie worden gemodelleerd. Bij een superpositiemodel wordt uitgegaan van een situatie zonder grondwaterstroming (model zonder stijghoogteverschillen en zonder onttrekkingen), waarna alleen de ingreep wordt gemodelleerd. Als resultaat worden dan uitsluitend de effecten van de ingreep berekend. Bij het gebruik van analytische formules wordt altijd op deze manier te werk gegaan. In theorie is superpositie geoorloofd, in ieder geval als alle grondconstanten en randvoorwaarden tijdens de ingreep onveranderd blijven. Bij numerieke modellen kan wel met zulke veranderingen rekening gehouden worden, bijvoorbeeld wanneer door grondwaterstandsverlagingen  $kD$ -waarden,  $c$ -waarden en/of opbrengstcoëfficiënten moeten worden aangepast en ook wanneer waterlopen (greppels, beken en dergelijke) droogvallen. In de ontwerpfasen zal bij de berekening van grondwaterstanden en invloedsgebieden in het algemeen met superpositiemodellen worden gewerkt. Het numerieke model wordt meestal ook gebruikt om de toekomstige situatie te modelleren, d.w.z. de oorspronkelijke situatie plus de ingreep. Veldmetingen tijdens de ingreep (bijvoorbeeld ten behoeve van monitoring) kunnen dan gemakkelijk met de modelresultaten worden vergeleken. Een dergelijk model is ook geschikt voor de berekening van stroomsnelheden, stroombanen, intrekgebieden en de verplaatsing van verontreinigingen.

Met numerieke modellen kunnen de resultaten van verschillende ontwerpen (scenario's, varianten) in het algemeen eenvoudig worden vergeleken. Ook wanneer superpositie niet is toegestaan kunnen door verschilberekeningen tussen modellen, met en zonder ingreep, gemakkelijk de effecten van de ingreep zelf worden bepaald. De vergelijking tussen modeluitkomsten wordt ook toegepast om een indruk te krijgen van de nauwkeurigheid van de resultaten, door één of enkele gevoelige parameters binnen aannemelijke grenzen te laten variëren.

## **Conclusies**

De keuze tussen een analytisch en een numeriek model is eenvoudig omdat een numeriek model in praktisch alle opzichten meer heeft te bieden. De belangrijkste voordelen zijn: de berekening is eenvoudiger uit te voeren, detaillering van de ondergrond en de randvoorwaarden is mogelijk, de werkelijke grondwaterstroming kan worden gemodelleerd (niet alleen de effecten van de ingreep) en de resultaten van de modellering kunnen in vele vormen worden gepresenteerd. De keuze tussen de eindige-differentie- en de eindige-elementen-methode is minder belangrijk: onregelmatige eindige-elementen-netwerken hebben echter meer mogelijkheden om ruimtelijke vormen te modelleren. Een handige netwerkgenera-

tor is hiervoor vereist. De kleinere grondwatersystemen bij civieltechnische modelleringen kunnen gevoelig zijn voor lokale details van de hydraulische eigenschappen en de randvoorwaarden. Deze gevoeligheid kan met het model worden vastgesteld.

## Literatuur

**Hemker, C.J. (1997)** De betrouwbaarheid van parameters bij automatische kalibratie. In: M.R. van der Valk en H. Boukes (red) *Modelkalibratie: Het automatisch ijken van grondwatermodellen*, NHV-special nummer 2, Nederlandse Hydrologische Vereniging, Utrecht.

**MicroFem (1999)** Internet: <http://www.xs4all.nl/~microfem>.