

# Aantekeningen bij de NHV-bijeenkomst 'Stroming van grondwater: kunnen we dat beter begrijpen?' en ochtendsessie over analytische elementen

WILLEM JAN ZAADNOORDIJK

*Op 25 november 2022 vond een middagsymposium plaats dat Wim de Lange organiseerde ter gelegenheid van zijn afscheid bij Deltares. Bovendien had hij een kleine groep uitgenodigd om 's morgens te praten over de stand van zaken met betrekking tot analytische elementen. Gezamenlijk thema was de kracht van eenvoudige benaderingen, die ook met de beschikbaarheid van de landelijke en regionale modellen van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) nodig blijven. Eenvoudige benaderingen helpen veel meer dan ingewikkelde modellen om de werking van het systeem te doorgronden. Zo kunnen de relevante processen bij vraagstellingen verkend worden om deze ingewikkelde modellen effectief toe te passen (of in te zien dat dat niet nodig is voor een specifieke vraag). Ik beschrijf wat er die dag langskwam en vul dat aan met achtergronden en persoonlijke opmerkingen die cursief zijn weergegeven.*

Essay

## Inleiding

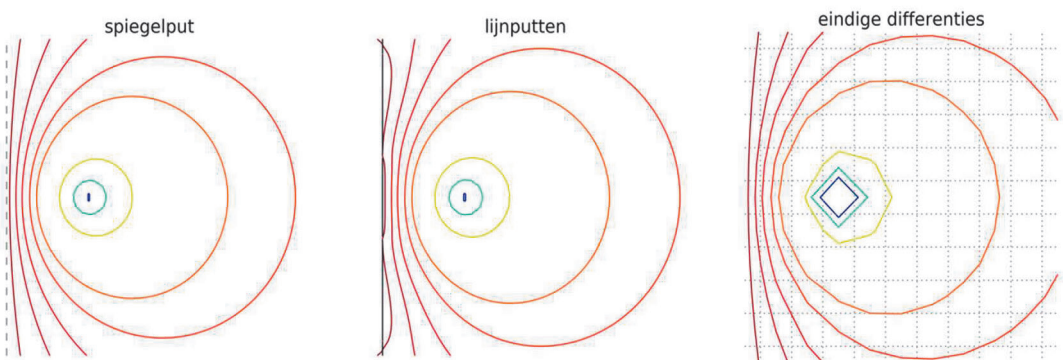
Analytische oplossingen voor grondwaterstroming associëren veel mensen met de eenvoudige berekeningen uit inleidingen van dat vakgebied. Daarin wordt bijvoorbeeld een put met stijghoogte als logaritme van de afstand in een uniforme stroming gepresenteerd. Deze oplossingen lijken ver van de praktijk af te staan: het genoemde voorbeeld is niet bruikbaar voor de berekening van het effect van een onttrekking door de ongrijpbaarheid van de zogenaamde 'invloedsstraal' (zie bijvoorbeeld Bresciani e.a., 2020). Die indruk van praktische onbruikbaarheid wordt nog versterkt als ten onrechte gesuggereerd blijft worden dat je met een analytische formule verlagingen door een onttrekking in een niet-lineair systeem kan berekenen. In een niet-lineair systeem hangt het effect immers af van de omstandigheden, gaat superpositie niet op en moet je het effect berekenen als verschil tussen een simulatie met en zonder de ingreep (Zaadnoordijk, 2017). Veel systemen zijn echter bij benadering lineair (bijvoorbeeld Strack, 1989) en dan biedt superpositie van analytische oplossingen juist extra mogelijkheden. Met dit inzicht heeft Otto Strack de analytische-elementenmethode ontworpen (bijvoorbeeld Strack en Haitjema, 1981) en uitgewerkt in het simulatieprogramma MLAEM dat door Wim de Lange geadopteerd is bij RIZA voor het nationale grondwatermodel NaGroM (de Lange, 1991, 2006). De Tim-programma's TimML en TTim van Mark Bakker (zie <https://github.com/mbakker7>) zijn ook op de analytische-elementenmethode gebaseerd, waarbij het idee is dat de elementen de geohydrologische aspecten weergeven die de grondwaterstroming bepalen,

zoals grondwateraanvulling, onttrekkingen, oppervlaktewater zonder dat een vlakdekkende discretisatie nodig is. Deze opzet nodigt uit tot stapsgewijs modelleren (Haitjema, 1995a) waarbij het stap voor stap toevoegen van elementen inzicht geeft in de werking van het grondwatersysteem en de invloed van de verschillende aspecten op de stroming. Stapsgewijs modelleren kan natuurlijk ook met andere methoden. Zo gebruiken Hill en Tiedeman (2007) MODFLOW in hun gedegen boek over modelopzet, -kalibratie en -betrouwbaarheidsanalyse. Naast stapsgewijs ingewikkelder maken van een model kan ook een omgekeerde beweging gebruikt worden als in een ingewikkeld model blijkt dat maar een paar parameters relevant zijn voor een te berekenen uitkomst.

De analytische-elementenmethode en inzichten uit versimpelen kwamen beiden langs op deze dag, waarbij natuurlijk ook de activiteiten van Wim de Lange bij RIZA en Deltares aan bod kwamen: het nationaal grondwatermodel NaGroM en de daarbij gebruikte topsysteemrandvoorwaarde.

### Analytische-elementenmethode

De analytische-elementenmethode kijkt op een aantal aspecten af van numerieke methodes waarbij het stromingsdomein gediscretiseerd wordt in cellen of elementen (zie bijvoorbeeld Strack, 1989, Haitjema, 1995a en Bakker en Kelson, 2009). Bij discretisatie van het domein wordt alleen voor specifieke punten een grondwaterstijghoogte berekend. De analytische-elementenmethode geeft een oplossing waarin de stijghoogte een functie van de coördinaten is, zodat voor elk willekeurig punt de stijghoogte berekend kan worden. De benadering zit hierbij in randvoorwaarden waaraan niet langs de hele rand exact voldaan wordt, maar slechts in een beperkt aantal punten. Dit kan geïllustreerd worden met een onttrekking nabij een waterloop (Afbeelding 1).



**Afbeelding 1:** Isohyphen (-5, -3, -2, -1, -0.75, -0.5, -0.3, -0.1) rond een onttrekking nabij een waterloop met waterstand 0 voor een analytische berekening (links), een model met analytische elementen (midden) en een MODFLOW-model (rechts).

Voor deze situatie kan de stijghoogte analytisch berekend worden door een put met een spiegelput te gebruiken (Afbeelding 1 links). Met analytische elementen kan deze geschematiseerd worden met een puntonttrekking voor de put en lijnputten voor de waterloop (Afbeelding 1 midden). De hier gebruikte een-

voudige lijnputten hebben een constant debiet per meter lengte, dat berekend wordt met de stijghoogte in het midden van het lijnsegment. Voor een eindige-elementen- of eindige-differentiemodel (Afbeelding 1 rechts) zou je een voldoende groot gebied rond de put tot aan de waterloop selecteren – waarbij de vereiste grootte samenhangt met de lengte waarover je lijnputten plaatst voor de waterloop in het analytische-elementenmodel.

Analytische-elementenoplossingen geven soms verwarring. Die verwarring is soms enkel cosmetisch als mensen zien dat heel ver weg stijghoogtes gedefinieerd zijn (terwijl je met MODFLOW niet buiten het modelgebied kan kijken). Het kan ook aanleiding geven tot ongeldige conclusies, als de randvoorwaarden voor een probleem onvoldoende zijn gerepresenteerd met analytische elementen en de stroming en stijghoogte ver weg de oplossing beïnvloeden (vergelijkbaar met het gebruik van een onterechte vaste stijghoogterand in MODFLOW).

### Ochtendprogramma: stand van zaken analytische-elementenmethode

Het ochtendprogramma begon met een opname van Erik Strack waarin hij een korte demonstratie gaf van het invoeren van elementen in de grafische gebruikersomgeving van MLAEM, het analytische-elementenprogramma van zijn vader, Otto Strack. Erik heeft deze grafische omgeving overgezet naar OpenGL (<https://www.opengl.org/>), zodat die in principe onafhankelijk van het computerbesturingssysteem is geworden. Vader en zoon zijn van plan om MLAEM beschikbaar te maken op GitHub.

*Het werd niet duidelijk in hoeverre het simulatieprogramma verbeterd of uitgebreid is sinds de NaGroM-tijd. Toen kon het echter al met vrij veel niet-lineairiteit omgaan voor een analytisch-elementenprogramma: freatische aquifers (ook diepere), variabele topsysteemweerstand en droogvallende waterlopen. Aan de andere kant is voor lek door scheidende lagen een vlakdekkende belegging met zogenaamde lek-elementen nodig. MLAEM heeft verder de beperking dat het alleen stationaire simulaties uit kan voeren.*

Vervolgens vertelde Mark Bakker (TU Delft) over zijn Tim programma's: TimML en TTim. De naam Tim (verwijzend naar "Tim the enchanter" ofwel Tim de Duidendkunstenaar uit de film "Monty Python and the Holy Grail"; zie Bakker 2002) is gekozen toen Mark Bakker en Vic Kelson voor het eerst een analytische-elementenprogramma in Python opzetten (Bakker en Kelson, 2009). Het eerste programma was TimSL voor een enkel watervoerend pakket ('Single Layer'). Hieraan heb ik tijdsafhankelijke elementen bijgedragen (Zaadnoordijk, 2005), die echter zo lastig te gebruiken zijn dat het begrijpelijk is dat dit programma uit het zicht is verdwenen.

De ML in TimML staat net zoals bij MLAEM voor 'multi layer' en geeft aan dat multi-aquiferstroming gesimuleerd kan worden, bij TimML ook alleen stationair. De eerste T in TTim geeft daarentegen aan dat dit programma tijdsafhankelijke simulaties kan uitvoeren en wel verschillen ten opzichte van een initiële situatie waarin alle stijghoogtes gelijk zijn aan nul. Door TTim-resultaten te superponeren op uitkomsten van TimML kan de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de stroming vanaf een willekeurige stationaire situatie gesimuleerd worden.

*TimML en TTim vormen dus een krachtige analytische-elementencombinatie die bovendien geen discretisatie van scheidende lagen nodig heeft omdat de afzonderlijke programma's gebaseerd zijn op analytische oplossingen voor meerlagensystemen en niet op enkellaagoplossingen zoals MLAEM. Bovendien houdt TTim rekening met de berging in scheidende lagen op vergelijkbare wijze als MLU van Kick Hemker (<https://mlu.app>) waardoor scheidende lagen niet onderverdeeld hoeven worden in meerdere rekenlagen om de vertraagde doorwerking door een kleilaag van een verandering te simuleren.*

De meerlagenoplossingen en het tijdsafhankelijk rekenen vragen meer rekenkracht dan Python als scripttaal standaard biedt. De oplossing met Fortranextensies maakte TimML in het verleden lastig te onderhouden en te installeren. Tegenwoordig levert het Pythonpakket Numba de benodigde versnelling op willekeurige versies van besturingssystemen en Python. De programma's zijn beschikbaar op GitHub (<https://github.com/mbakker7?tab=repositories>). TimML en TTim kunnen samen met alle bij Python beschikbare functionaliteit gebruikt worden. Voor wie het werken met Pythonscripts een te hoge drempel is, is er bij Deltares een QGis-plugin (<https://plugins.qgis.org/plugins/qgistim/>) gemaakt als grafische gebruikersschil waar Huite Bootsma later deze ochtend over vertelde. Ook verzorgt TimML op de achtergrond de berekeningen voor de website <http://www.drainagequicksan.nl> van de POV Piping (deze 'Projectoverstijgende Verkenning' was een samenwerking van waterschappen, Rijkswaterstaat, ingenieursbureaus, marktpartijen en kennisinstituten).

Henk Haitjema belichtte zijn analytische-elementenprogramma GFlow, dat hij omschreef als een programma op instapniveau. Hij maakt er dan ook gebruik van bij zijn lesboek over grondwatermodellering met nadruk op stapsgewijs modelleren (Haitjema, 1995a). Het is goed bruikbaar voor allerlei praktische vragen. Henk onderhoudt het programma niet meer, maar het is wel gratis te downloaden bij de milieudienst van de Verenigde Staten: (<https://www.epa.gov/ceam/gflow-groundwater-flow-analytic-element-model>). GFlow kan stationaire enkellaagssimulaties uitvoeren, wat in de Verenigde Staten toepasbaar is in de wijdverbreide fluvioglaciale aquifers. Bij GFlow is speciale aandacht besteed aan de interactie tussen grond- en oppervlaktewater. Waterlopen worden als polylijnen geschematiseerd waarbij het debiet in de waterloop bijgehouden kan worden en droogval gesimuleerd kan worden. Bij het maken is gerealiseerd dat het niet het enige stuk gereedschap van een hydroloog kan zijn en daarom is er een optie toegevoegd om een export naar MODFLOW te maken, waarbij GFlow-stijghoogten als randvoorwaarden meegegeven worden voor meer gedetailleerde driedimensionale berekeningen. Daarnaast heeft GFlow een grafische gebruikersschil.

Huite Bootsma (Deltares) presenteerde vervolgens QGIS-Tim, een invoegtoepassing voor QGIS (<https://www.qgis.org>), die een grafische gebruikersschil voor TimML bevat. Deltares is hiermee aan de slag gegaan omdat het programma MWELL verouderd was en TimML dergelijke simulaties uit kan voeren, maar de aansturing van TimML via Python voor de gebruikers van MWELL een te grote drempel is om op dat programma over te stappen. Voor de ontwikkeling van QGIS-Tim kon voortgebouwd worden op iMod-QGis. De invoegtoepassing slaat

alle informatie van een model in één geopackagefile op. De gebruiker kan interactief de lagschematisatie specificeren en elementen invoeren, eventueel met GIS-kaarten. Ook het uitvoeren van de berekening en visualiseren van resultaten wordt door de invoegtoepassing gefaciliteerd. Er is een brede belangstelling voor QGIS-Tim die heeft geresulteerd in het opzetten van een TKI-project waarin het verder ontwikkeld wordt.

Na deze presentatie volgde een discussie. Hierin werd het programma AnAqSim van Charlie Fitts genoemd (<https://www.fittsgeosolutions.com/anaqsim/>). AnAqSim is een internationaal veelgebruikt analytische-elementenprogramma met een goede grafische gebruikersschil. *Het programma wordt actief onderhouden en ondersteund. Het is een meerlagen-programma en heeft als bijzonderheid dat het werkt met een of meer polygonen waarbinnen een bepaalde aquiferconfiguratie aanwezig is. Daardoor kan bijvoorbeeld met uitwiggende scheidende lagen gewerkt worden. Het maakt ook dat de stijghoogteoplossingen niet tot in het oneindige doorlopen, wat verwarring voorkomt bij mensen die minder zijn ingevoerd in de theoretische achtergronden van de wiskunde en analytische oplossingen waar de analytische-elementenmethode op gebaseerd is.*

Er werd ook gesproken over het toegankelijker maken van analytische-elementenprogramma's. Voor sommige geohydrologen maakt een gebruikersschil zoals die van AnAqSim het gebruik veel makkelijker dan de aansturing vanuit Python van TimML en TTim. Aan de andere kant zijn de invoer- en uitvoeropties van een gebruikersschil bepalend voor hoeveel werk het is om bestaande data als invoer te gebruiken en om benodigde analyses van de uitvoer te maken. Specifieke functies in een grafische gebruikersschil vragen veel inspanning.

Aansluiten op bestaande en veelgebruikte software zoals QGIS zou de vereiste inspanning kunnen verminderen, waarbij het wel de vraag is of dit de drempel voldoende verlaagt voor de beoogde gebruikers of dat die toch meer geholpen zijn met specifieke grafische aansturingen zoals die van AnAqSim.

## **Middagprogramma: Stroming van grondwater – kunnen we dat beter begrijpen**

's Middags volgde een NHV-symposium waar volgens de aankondiging "fervent conceptueel denkers over grondwaterstroming" persoonlijke inzichten zouden delen. De bijeenkomst werd geopend door Timo Kroon met een schets van de loopbaan van Wim de Lange. Historische namen en termen als RIZA, NaGroM en Consensushydrologie kwamen langs. Wim heeft zijn werkzaamheden beëindigd bij Deltares, maar blijft actief in de adviescommissie schade grondwateronttrekkingen (ACSG) van de gezamenlijke provincies (BIJ12).

Theo Olsthoorn kreeg vervolgens het woord als dagvoorzitter. Hij voerde die taak zeer goed uit door de sprekers persoonlijk te introduceren en door de discussies in goede banen te leiden, met een scherp oog voor de inhoudelijk belangrijke punten.

### ***Verzamelpotentiaal***

Otto Strack was vanwege ziekte niet in persoon aanwezig, maar had een presentatie opgenomen over stroming in een gelaagd zandpakket. Hij richtte zich

op de grondwaterstroming door een systeem met uniforme horizontale lagen zoals hij die beschreven heeft in Strack (2017). Hij definieerde hiervoor een stromingspotentiaal ("*comprehensive discharge potential*" in het boek waarmee hij de Analytische-Elementenmethode definitief op de kaart zette: Strack, 1989) als verticale integratie van de diktes en horizontale doorlatendheden van de lagen in samenhang met de positie van het freatisch vlak. Hij liet zien dat met deze stromingspotentiaal de totale stroming (*comprehensive discharge* in Strack, 1989) exact berekend kan worden zonder kennis van de verticale doorlatendheden. *De beperking is dat de verdeling van stijghoogtes en fluxen binnen het domein niet bekend is.*

### **Verticale anisotropie**

Mark Bakker gebruikte ook een schematisatie met oneindig uitgestrekte horizontale lagen. Hij belichtte juist het belang van de verticale doorlatendheid en richtte zich op het vertalen van het meerlagensysteem naar een enkele laag met equivalente doorlatendheden en speciaal op de verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid, de equivalente anisotropie. Met TimML voerde hij simulaties uit met een groot aantal lagen, waarbij hij de eigenschappen van de lagen meer of minder willekeurig verdeelde. De verrassing was niet zozeer dat de equivalente anisotropie afhankelijk was van de stromingssituatie, maar veeleer hoe sterk de waarde kon variëren bij verschillende stromingspatronen. *Vanuit geologisch perspectief is het nodige af te dingen op de willekeurige verticale verdeling van doorlatendheden en op de horizontaal oneindig uitgestrekte lagen door de sedimentatieprocessen waar ze mee samenhangen. Naar verwachting zorgen eindige lagen voor minder variatie in de anisotropie met de stromingssituatie. Toch blijft de boodschap van Mark belangrijk: anisotropie en doorlatendheden zijn modelparameters en geen fysische grootheden. Dit geldt zowel voor de generieke hydraulische parametrisatie in REGIS II en GeoTOP, modellen van de Basisregistratie Ondergrond (BRO), alsook voor gekalibreerde grondwatermodellen. Ga dus altijd na hoe groot de onzekerheid is van hydraulische parameters in het licht van de modeltoepassing.*

### **Negatieve weerstanden?**

Kees Maas greep terug op een oud artikel uit Stromingen (Maas, 2003). Hij liet zien dat bij een 'standaard' schematisatie van een waterloop als een enkele rij cellen boven in een watervoerend pakket waarvan de gehele dikte met één laag wordt geschematiseerd aanleiding kan geven tot de noodzaak om negatieve weerstanden te gebruiken. Net als destijds ontstond er weer discussie over het al dan niet negatief kunnen zijn van weerstanden in een modelschematisatie. *Deze vraag is niet relevant voor de praktijk. Daarvoor is de les belangrijk dat elke simulatie vraagt om een geschikte schematisatie en dat een veelgebruikte schematisatie niet noodzakelijk geschikt is.*

### **Schematiseren invloed oppervlaktewater in grondwaterberekeningen**

Jan van Bakel kwam met een onderwerp waar – ook in Stromingen – al veel discussie over is geweest (bijvoorbeeld De Lange 1997a,b,c, Van Drecht 1997 en Van Bakel e.a., 2002 en waar het laatste woord nog niet over is gezegd: de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater. Hij begon natuurlijk met Ernst (1962) die

een drainageweerstand definieerde als verhouding tussen opbolling van de grondwaterstand tussen waterlopen ten opzichte van de waterstand in de waterlopen en de afvoer naar de waterloop. Hij verdeelde die weerstand onder in een horizontale, verticale, radiale en intredecomponent en werkte die theoretisch uit.

Hij presenteerde als uitbreiding hierop 'Wim 2.0' van de werkgroep cel-drainageweerstand. Jan vergeleek met wat hij een MODFLOW-aanpak noemde, namelijk waterlopen aan een cel koppelen met het waterloopoppervlak binnen de cel en de waterbodempweerstand.

*MODFLOW staat ook andere aanpakken toe. Hierbij geldt weer dat de parameterisatie modelafhankelijk is en dat theoretische beschouwingen niet het ultieme antwoord kunnen leveren.*

Zoals uit de zaal werd opgemerkt, blijft het de vraag of de interactie met oppervlaktewater theoretisch beschreven kan worden of dat kalibratie nodig is om tot goede parameters te komen.

### **Verblijftijdverdeling**

Henk Haitjema vertelde over een ervaring dat een ingewikkeld systeem erg simpele eigenschappen kan hebben. In een project over de uitspoeling van nutriënten naar een beekstelsysteem moest de verblijftijdverdeling in het grondwater berekend worden. In het opgezette GFlow-model met een gedetailleerde weergave van het oppervlaktewater bleken verblijftijden onafhankelijk van de grootte en vorm van het grondwatersysteem, het oppervlaktewatersysteem en de doorlatendheid. Alleen de factor  $nH/N$  leek een rol te spelen, waarin  $n$  staat voor porositeit,  $H$  voor verzadigde dikte en  $N$  voor grondwateraanvulling. De eerste reactie was om de numerieke simulaties te controleren. In tweede instantie bleek het mogelijk de relatie theoretisch te bewijzen, bij constante porositeit, transmissiviteit en grondwateraanvulling binnen het grondwatersysteem (Haitjema, 1995b). In vervolgonderzoek bleken de afwijkingen beperkt als niet aan deze voorwaarden wordt voldaan (Luther en Haitjema, 1998 en Abrams en Haitjema, 2018). *Samen met de presentatie van Otto Strack illustreerde Henk hier dat het voor globale uitspraken over een systeem niet nodig is alle details ervan te kennen.*

### **Dispersie**

Wim de Lange begon zijn voordracht "lijkt modeldispersie wel op wat er in het veld gebeurt?" met een moeilijk te volgen inleiding, waarin hij stelde dat de dispersiecoëfficiënten die afgeleid worden uit veldexperimenten niet kloppen.

*Nu is dispersie een lastig onderwerp. Er is zelfs gezegd dat het helemaal niet bestaat, maar een modelleringstruc is om afvlakking van concentratieverschillen te beschrijven die wordt veroorzaakt door fysische aspecten die niet expliciet in een stoftransportmodel zijn opgenomen (Boukes, 1996). Dit is een weinig praktische redenering. Langs dezelfde lijn zouden we moeten zeggen dat de doorlatendheid zoals we die in de wet van Darcy gebruiken niet bestaat omdat die doorlatendheid bepaald wordt door de stroming van het grondwater tussen de vaste delen van de ondergrond en berekend kan worden met exacte kennis van de poriestructuur (zie bijvoorbeeld Xiong e.a. (2016) voor een overzicht van "pore network modelling" en het programma "From pore to core" van Majid Hasanizadeh en mede-onderzoekers). De kern van modelleren is het vereenvoudigen van de complexe werkelijkheid tot een hanteerbare beschrijving die recht*

*doet aan de relevante verbanden voor het gestelde doel.*

*Teruggaand naar dispersie, kunnen we zeggen dat het geen fundamentele fysische eigenschap is maar een grootheid in een modelleringscontext. Daarmee begrijp ik niet hoe dispersiecoëfficiënten uit veldexperimenten niet kunnen kloppen. Je interpreteert de concentraties uit een veldproef met een model en kalibreert daarbij de dispersiecoëfficiënten en dat zijn dus per definitie de te hanteren waarden in die modelschematisatie. Als Wim bedoelde dat die veldproefwaarden niet passen bij een andere stromingssituatie of andere modelschematisatie, dan wordt het logisch – net zoals de variabiliteit van de doorlatendheid die Mark Bakker liet zien.*

Gelukkig ging hij verder met een concept dat de dispersie tastbaarder maakt en er wellicht aan kan bijdragen dat dispersiecoëfficiënten beter vertaald kunnen worden naar andere gebieden en andere modeldiscretisaties. Hij koppelde de dispersie aan heterogeniteit in de vorm van een lens met een afwijkende doorlatendheid in een homogeen medium (De Lange, 2020).

*Heterogeniteit is een belangrijke oorzaak maar er zijn ook andere processen die een rol kunnen spelen, zoals tijdsafhankelijke stroming (Goode, 1992) en sorptie (zie bijvoorbeeld Van den Brink en Zaadnoordijk, 1997). Ook zijn er andere vormen van heterogeniteit die een andere invloed op stoftransport zullen hebben. Dat het gepresenteerde concept voor dispersie geen algemene geldigheid heeft, neemt niet weg dat het kan helpen om verspreiding van opgeloste stoffen in voorkomende gevallen beter te begrijpen.*

Afsluitend werden hapjes en drankjes geserveerd en volgden levendige gesprekken. Deze zullen niet alleen gevoed zijn door de inhoud van de presentaties, maar ook door het weerzien van veel oude bekenden uit de grondwaterwereld.

## Conclusies

De grijsheid van de sprekers en de ouderdom van veel verhalen op het middagsymposium suggereerde ten onrechte dat de gepropageerde aanpak met simpele benaderingen iets van het verleden zou zijn. Gelukkig bleek 's morgens dat er een gezonde belangstelling voor is bij de nieuwe generatie hydrologen, die zich bijvoorbeeld uit in het door Deltares opgezette project QGis-TIM binnen de topsector water.

Bij het maken van een (ingewikkeld) model is het goed om een (kwantitatief) idee te hebben van de resultaten. Zonder verwachting leer je niets. Juist uit het analyseren van resultaten die tegen je verwachting ingaan krijg je nieuwe inzichten. Hierbij zijn simpele benaderingen van onschatbare waarde.

Voor simpele benaderingen is elk simulatiegereedschap bruikbaar waar je bedreven mee bent. Zaak is om telkens voordat je een model ingewikkelder maakt, de lessen van het simpelere model goed te doorgronden, inclusief parametergevoeligheden, -correlaties en bandbreedtes van de resultaten.

## Literatuur

**Abrams, D. en H. Haitjema** (2018) How Aquifer Characteristics of a Watershed Affect Transit Time Distributions of Groundwater; Technical Commentary *Groundwater*, vol 56(4), pag 517-520 doi 10.1111/gwat.12788.



- Bakel, P.J.T van, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors, P. Groenendijk en K. Kovar** (2002) De parametrisatie van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater voor landelijke en regionale grondwatermodellering; in: *Stromingen* jrg 8(2), pag 5-9.
- Bakker, M.** (2002) Monty Python en het Holy Grondwatermodel; in: *Stromingen* jrg 8(4), pag 37-47.
- Bakker, M. en V.A. Kelson** (2009) Writing Analytic Element Programs in Python; in: *Groundwater*, vol 47(6), pag 828-834, doi 10.1111/j.1745-6584.2009.00583.x.
- Boukes, H.** (1996) Diskussie: dispersie bestaat niet; in: *Stromingen*, jrg 2(1), pag 39-43.
- Bresciani, E., R.N. Shandilya, P.K. Kang en S. Lee** (2020) Well radius of influence and radius of investigation: What exactly are they and how to estimate them?; in: *Journal of Hydrology*, vol 583, 124646, doi 10.1016/j.jhydrol.2020.124646.
- Brink, C. van den en W.J. Zaadnoordijk** (1997) Nonequilibrium transport of organic chemicals during aquifer remediation; *Hydrological Sciences Journal*, vol 42(2), pag 245-264.
- Drecht, G. van** (1997) Modellen voor diffuse ontwatering in de toplaag; *Stromingen*, jrg 3(2), pag 5-16.
- Ernst, L.F.** (1962) Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij de aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen; Pudoc 67.15, Centrum voor landbouwpublicaties en landbouwdocumentatie, Wageningen.
- Goode, D.J.** (1992) Modeling Transport in Transient Ground-Water Flow: An Unacknowledged Approximation; in: *Groundwater*, vol 30(2), pag 257-261.
- Haitjema, H.M.** (1995a) Analytic modelling of groundwater flow; Academic Press, San Diego CA, VS, pdf beschikbaar op <https://www.haitjema.com>.
- Haitjema, H.M.** (1995b) On the residence time distribution in idealized groundwatersheds; in: *Journal of Hydrology*, vol 172, pag 127-146.
- Hill, M.C. en C.R. Tiedeman** (2007) Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities and uncertainty; Wiley, Hoboken NJ, VS.
- Lange, W.J. de** (1991) A groundwater model of the Netherlands; Report 90066, RIZA, Lelystad.
- Lange, W.J. de (1997a)** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel, Deel 1: De basis voor het modelconcept; in: *Stromingen*, jrg 3(2), pag 17-28.
- Lange, W.J. de (1997b)** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel, Deel 2: Het gebruik van de randvoorwaarde; in: *Stromingen*, jrg 3(3), pag 31-47.
- Lange, W.J. de (1997c)** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel, Deel 3: Het parameteriseren van de randvoorwaarde; in: *Stromingen*, jrg 3(4), pag 43-56.
- Lange, W.J. de** (2006) Development of an Analytic Element Ground Water Model of the Netherlands; Historical note *Groundwater*, vol 44(1), pag 111-115.
- Lange, W.J. de** (2020) Advective Transport Phenomena to Better Understand Dispersion in Field and Modeling Practice; in: *Groundwater*, vol 58(1), pag 46-55.

- Luther, K. en H.M. Haitjema** (1998) Numerical experiments on the residence time distributions of heterogeneous groundwatersheds; in: *Journal of Hydrology*, vol 207, pag 1-17.
- Maas, K.** (2003) Ondiepe waterlopen in Modflow; in: *Stromingen*, jrg 9(3), pag 37-45.
- Strack, O.D.L en H.M. Haitjema** (1981) Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities: 1. Solution for homogeneous permeability; in: *Water Resources Research*, vol 17(5), pag 1535-1549.
- Strack, O.D.L.** (1989) *Groundwater Mechanics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, VS.
- Strack, O.D.L.** (2017) Vertically integrated flow in stratified aquifers; in: *Journal of Hydrology*, vol 548, pag 794-800, doi 10.1016/j.jhydrol.2017.01.039.
- Xiong, Q., T.G. Baychev en A.P. Jivkov** (2016) Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport; in: *Journal of Contaminant Hydrology*, vol 192, pag 101-117, doi 10.1016/j.jconhyd.2016.07.002
- Zaadnoordijk, W.J.** (2005) Building Pit Dewatering: Application of Transient Analytic Elements; in: *Groundwater*, vol 44(1), pag 106-110 doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00171.x
- Zaadnoordijk, W.J.** (2017) Kanttekeningen bij gebruik van differentiaalvergelijking van v/d Akker (2013); notitie beschikbaar op [http://debakelsestroom.nl/kennisbank/attachment/memobijdiffvergvdakker\\_v4\\_opm-jvb-20-maart-2017/](http://debakelsestroom.nl/kennisbank/attachment/memobijdiffvergvdakker_v4_opm-jvb-20-maart-2017/).
- Zhou, Y. en H.M. Haitjema** (2011) Approximate Solutions for Radial Travel Time and Capture Zone in Unconfined Aquifers; in: *Groundwater*, vol 50(5), pag 799-803, doi 10.1111/j.1745-6584.2011.00883.x.

## Summary Notes From the NHV-meeting on Better Understanding of Groundwater Flow and the Morning Session on Analytic Elements

*On the occasion of his retirement from Deltares, Wim de Lange organized a symposium on the afternoon of 25 November 2022. In addition, he invited a small group in the morning to talk about the state of Analytic Elements. The overarching theme was the power of simple approximations in understanding the main characteristics of a groundwater system and the value of this also with the availability of the national and regional models of the Dutch National Hydrological Instrument (NHI). The simple approximations help to explore the question at hand so that these complex models can be applied effectively (or to see that they are not needed to answer the specific question).*

### Auteur

WILLEM JAN ZAADNOORDIJK  
 TNO Geologische Dienst Nederland / TU Delft – CiTG - Water Resources  
[willem\\_jan.zaadnoordijk@tno.nl](mailto:willem_jan.zaadnoordijk@tno.nl)