

Introductie

De Analytische Elementen Methode is oorspronkelijk ontwikkeld voor regionale stationaire grondwaterstroming [Strack & Haitjema, 1981a]. Het meest in het oog springende gebruik in Nederland is op het moment de ontwikkeling van een Nationaal GRondwater Model (NAGROM) door RIZA [De Lange, 1991 en H₂O, 1994]. Waarschijnlijk is de schaal van de meeste modellen die met analytische elementen gemaakt worden echter veel kleiner.



WILLEM JAN ZAADNOORDIJK
IWACO BV

Het grootste deel van de modellen die onlangs op het eerste congres over analytische elementen in Indianapolis, Indiana, USA (19-21 april 1994) werden gepresenteerd waren modellen van de lokale stroming bij bodemsaneringen. Op deze schaal doet het belangrijkste voordeel van de analytische elementen methode, namelijk dat de stroming rond bijvoorbeeld putten nauwkeurig wordt weergegeven, zich het sterkst gelden. Op lokale schaal loopt men echter ook het snelst tegen de beperkingen van de meeste huidige AEM-programma's aan, dat drie-dimensionale stroming en tijdsafhankelijke stroming niet (goed) gesimuleerd kunnen worden. Deze beperkingen kunnen zeker opgelost worden, maar vragen alleen meer wiskundige, en programmatechnische inspanning in vergelijking tot de eindige-elementen- en -differentiemethoden. Drie-dimensionale stroming is onder andere door Haitjema [1985], H. M. Haitjema & S. R. Kraemer [1988] en Fitts [1989, 1991] bestudeerd. Deze zal hier niet verder besproken worden. Haitjema & Strack [1985] modelleerden tijdsafhankelijke stroming met behulp van opeenvolgende stationaire situaties. De bergingsverschillen tussen twee opeenvolgende situaties werden correct verdisconteerd. Een andere aanpak is het creëren van tijdsafhankelijke stroming met behulp van tijdsafhankelijke elementen. Dit zijn oplossingen van de tijdsafhankelijke differentiaalvergelijking, die een verschijnsel in een oneindig uitgestrekt watervoerend pakket weergeven. Een al lang bekende oplossing die daarvoor gebruikt kan worden is de functie voor een tijdsafhankelijke put afkomstig uit de warmteleer, die door Theis [1935] geïntroduceerd is op het gebied van de grond-

Samenvatting

De Analytische Elementen Methode is in Nederland vooral bekend door de ontwikkeling van een Nationaal GRondwater Model (NAGROM). De methode leent zich echter zeker zo goed voor het maken van modellen waarmee lokale grondwaterstroming beschreven wordt. De analytische beschrijving van de stroming (bijvoorbeeld rond putten) is op deze schaal een groot voordeel. Bij lokale problemen zijn vaak tijdsafhankelijke effecten van belang. Deze kunnen echter niet met de beschikbare analytische elementenprogramma's beschreven worden.

Het programma ST (Stationair & Tijdsafhankelijk) bevat naast de gebruikelijke stationaire analytische elementen, ook de corresponderende tijdsafhankelijke analytische elementen. Beschikbaar zijn putten, lijnbronnen en oppervlakte-onttrekkingen. De stationaire elementen worden gebruikt voor de stationaire beginsituatie, de tijdsafhankelijke elementen modelleren de daaropvolgende variabele stroming.

Het modelleren met het programma ST wordt geïllustreerd aan de hand van een toepassing bij een grondwatersanering in een ondiep watervoerend pakket nabij een watergang. De saneringsputten worden altemeer bedreven en ook de natuurlijke grondwateraanvulling is variabel.

waterstroming. Er zijn ook functies beschikbaar voor tijdsafhankelijke lijnbronnen en oppervlakte-onttrekkingen [Zaadnoordijk, 1988]. Door implementatie van deze functies is een programma gemaakt waarmee tijdsafhankelijke stroming gesimuleerd kan worden met behulp van tijdsafhankelijke elementen.

In het navolgende worden het programma en een toepassing beschreven. Nadat de theoretische basis kort is aangegeven, wordt een uitleg gegeven van de belangrijkste eigenschappen van het programma. Vervolgens worden de mogelijkheden van het programma getoond aan de hand van een aantal simulaties.

Theoretische achtergrond

Analytische elementen zijn exacte oplossingen van de differentiaalvergelijkingen, waarmee de grondwaterstroming beschreven wordt. De gebruikte differentiaalvergelijkingen zijn gebaseerd op de volgende (algemeen gangbare) aannamen (zie bijvoorbeeld [Bear & Verruijt, 1987]):

- de eigenschappen van het grondwater en van de ondergrond variëren niet in de tijd of in de ruimte;
- de wet van Darcy is geldig en de doorlatendheid is isotroop;
- de basis van het watervoerend pakket is horizontaal en de dikte constant;
- de verticale weerstand heeft een verwaarloosbare invloed op de stroming in het watervoerend pakket, zodat de Kirkham-Dupuit aanname gebruikt kan worden;
- de berging van water in het watervoerend pakket is lineair, treedt instantaan op en is volledig reversibel waarbij de bergingscoëfficiënt constant is;
- de variatie van de watervoerende dikte is veel kleiner dan de gemiddelde waarde.

Deze aannamen leiden tot de warmtevergelijking in twee dimensies met een bronterm, zoals ze door wiskundigen genoemd wordt. Het is een gangbare vergelijking voor tijdsafhankelijke grondwaterstroming met natuurlijke grondwateraanvulling (zie ook bijv. [Freeze & Cherry, 1979 of Strack, 1989]).

Een deel van de analytische elementen die in een model gebruikt worden heeft coëfficiënten die van te voren onbekend zijn. Het bepalen van de oplossing bestaat uit het berekenen van deze coëfficiënten met behulp van de corresponderende vergelijkingen aan de hand van meetgegevens (bijvoorbeeld een gegeven stijghoogte in een kanaal-sectie). De stijghoogte is dan bekend als functie van x en y en kan dus op elk willekeurig punt uitgerekend worden door de betreffende coördinaten in de functie in te voeren. Dit geldt ook voor de snelheid van het grondwater. De horizontale componenten van de snelheidsvector worden verkregen met behulp van analytische differentiatie van de elementen. Aangezien de Kirkham-Dupuit aanname is gebruikt, moet de verticale verplaatsing langs een stromingsweg op andere wijze bepaald worden. Hiervoor wordt een continuïteitsvergelijking gebruikt [Strack, 1984 en 1989]. In geval van een vrije grondwaterspiegel wordt hierbij rekening gehouden met het verschil tussen de freatische bergingscoëfficiënt en de porositeit [Strack, 1989]. Het verschil geeft weer dat er hangwater achterblijft in de poriën als de grondwaterspiegel daalt. Dit is een eenvoudige schematisatie van de wijze waarop de onverzadigde zone de verzadigde grondwaterstroming beïnvloed. De schematisatie is bruikbaar voor ondiepe grondwaterstanden.

Het programma

De eerste versie van het gepresenteerde computerprogramma werd in 1988 geschreven voor de staat Minnesota in de Verenigde Staten. Sindsdien is er een aantal nieuwe programma's gemaakt, waarin geleidelijk de mogelijkheden uitgebreid zijn. Het huidige programma heeft de afkorting ST (Stationair & Tijdsafhankelijk) meegerekregen. De beginvoorwaarde wordt gevormd door een stationaire situatie. Deze wordt gemodelleerd met de standaard stationaire analytische elementen die ook gebruikt worden in het demonstratieprogramma SLWL [Strack, 1989] en het programma MLAEM [De Lange, 1991]. De volgende elementen zijn opgenomen in het programma ST:

- een constante bepaald door een referentiepunt;
- putten met gegeven debiet;
- lijnbronnen met gegeven debiet of stijghoogte in het midden;
- oppervlakte-onttrekkingen met gegeven debiet.

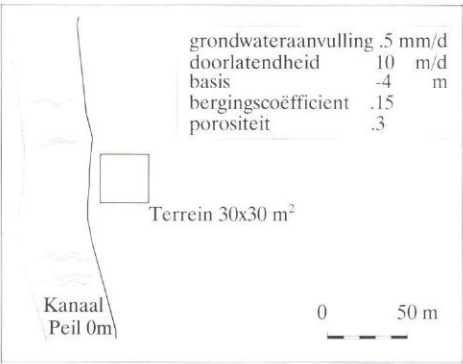
De debieten van de lijnbronnen en oppervlakte-onttrekkingen zijn constant in de ruimte. Deze elementen worden uitgebreid beschreven door Strack [1989]. Hij legt ook uit hoe de vergelijkingen opgesteld en opgelost worden, waarmee de waarden bepaald worden van de constante en de debieten van de lijnbronnen met gegeven stijghoogte. De opgenomen tijdsafhankelijke elementen hebben eveneens debieten die constant zijn in de ruimte. De variatie in de tijd is sprongsgewijs: de onttrekking is gelijk aan nul voor het aanvangstijdstip en vervolgens constant in de tijd. Het programma ST bevat de volgende tijdsafhankelijke elementen:

- uniforme ruimtelijk verdeelde onttrekking;
- putten met een gegeven debiet;
- lijnbronnen met een gegeven debiet;
- lijnstukken met een gegeven stijghoogte;
- oppervlakte-onttrekkingen met gegeven debiet.

Zaadnoordijk & Strack [1993] beschrijven deze elementen. De lijnstukken met gegeven stijghoogte bestaan uit een serie lijnbronnen met verschillende aanvangstijdstippen. De onttrekkingen van de lijnbronnen worden bepaald aan de hand van de gegeven stijghoogte op een wijze analoog aan die voor stationaire lijnbronnen met gegeven stijghoogte (zie ook [Zaadnoordijk, 1988 and Zaadnoordijk & Strack, 1993]).

Toepassing

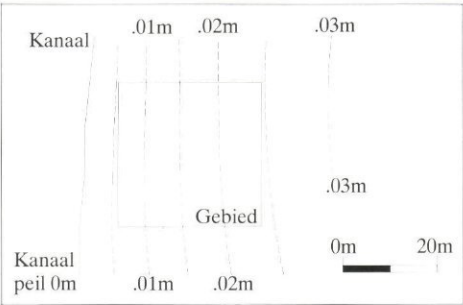
De werking van het programma ST wordt



Afb. 1 - Situatieschets met parameters watervoerend pakket.

in het navolgende gedemonstreerd aan de hand van een voorbeeld. Er is een model opgezet waarin diverse invloeden op de grondwaterstroming beschouwd worden, zoals intermitterend pompen en een variabele grondwateraanvulling. Op korte afstand van een kanaal is een terrein gelegen, waar zich een substantie in de grond bevindt die men wil verwijderen (zie afb. 1). De geohydrologie kan geschematiseerd worden tot één freatisch watervoerend pakket met een ondoorlatende basis op -4 m, een doorlatendheid van 10 m/d, een freatische bergingscoëfficiënt van 0,15 en een porositeit van 0,3. De gemiddelde grondwateraanvulling uit de neerslag is een halve millimeter per dag ($E = -0,0005$ m/d). Het kanaal snijdt diep in in het watervoerend pakket, zodat de oever een rand vormt met een vaste stijghoogte gelijk aan het peil van 0 m in het kanaal.

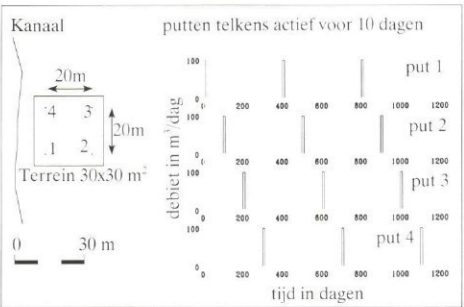
De stationaire stroming is gemodelleerd als de uitgangssituatie voor de overige berekeningen. De isohypsen zijn gegeven in afbeelding 2. De snelheid van het grondwater varieert van 0,2 tot 0,3 m/d onder het aangegeven terrein.



Afb. 2 - Isohypsen stationaire uitgangssituatie.

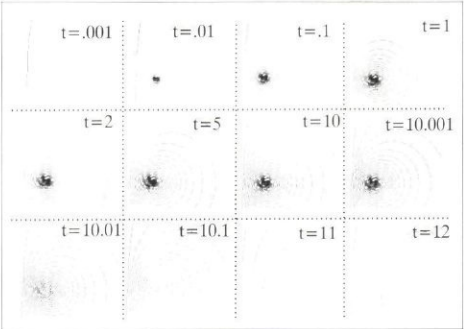
De te verwijderen substantie is voor een belangrijk deel geadsorbeerd aan de bodemdeeltjes. De desorptie verloopt traag. Als de snelheid van het grondwater vergroot wordt door pompen, dan treedt al snel geen evenwicht meer op tussen de

geadsorbeerde hoeveelheid en de concentratie in het water. De stofflux wordt zodoende de beperkende factor. Daarom is er voor gekozen om een aantal putten alternerend te bedienen (zie afb. 3).

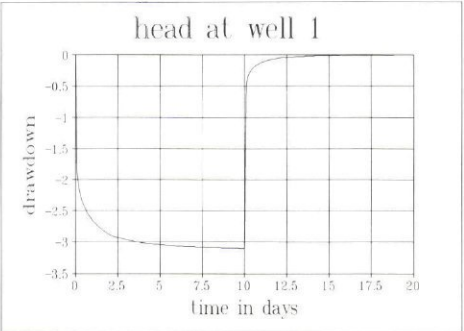


Afb. 3 - Lokatie putten en verloop debiet in de tijd.

Afb. 4 - Isohypsen rond uit- en aanzetten van een put.

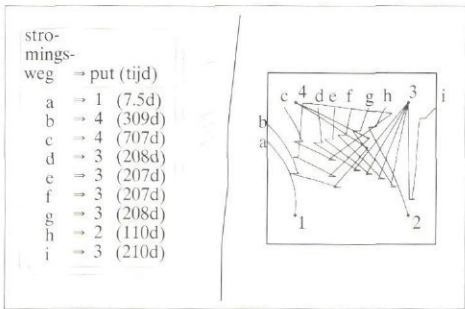


In afbeelding 4 zijn de isohypsen gegeven op een aantal verschillende tijdstippen. De tijdstippen zijn geconcentreerd rond het aan- en uitzetten van de eerste put (op tijdstip $t=0$ en $t=10$ d respectievelijk). In afbeelding 5 is bovendien de stijghoogte op de rand van de omstorting van put 1 gegeven als functie van de tijd.



Afb. 5 - Stijghoogte nabij put 1 rond het uit- en aanzetten van de put.

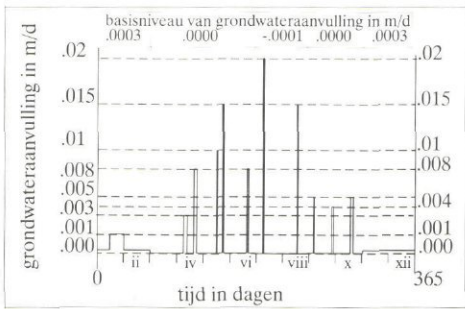
Zodra een put actief is, domineert deze onttrekking de lokale stroming. In de tussen gelegene intervallen herstelt de regionale stroming zich weer. Dit leidt tot de stromingswegen die zijn weergegeven in afbeelding 6. De stromingswegen zijn gestart aan de rand van het beschouwde terrein op het tijdstip $t=0$. In de periode



Afb. 6 - Stromingswegen.

van 10 dagen dat een put actief is, is er een grote verplaatsing in de richting van de put. De verplaatsing in de daaropvolgende 90 dagen, waarin de regionale stroming overheerst is veel kleiner.

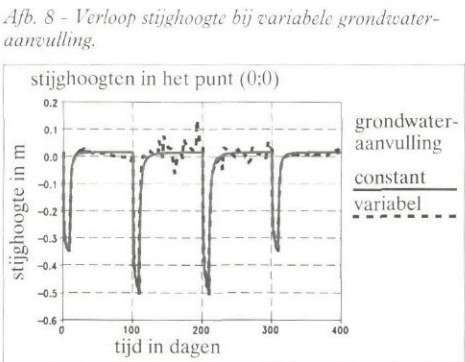
Bovenstaande berekening is uitgevoerd bij een uniforme grondwateraanvulling. Ter vergelijking is ook een berekening opgezet waarin de grondwateraanvulling variabel is (afb. 7). Het gemiddelde van deze variabele grondwateraanvulling is gelijk aan de constante waarde van 0,0005m/d die bij de voorgaande berekeningen is gebruikt.



Afb. 7 - Verloop variabele grondwateraanvulling.

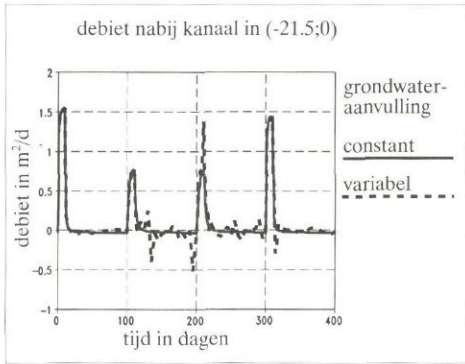
De invloed van de variabele grondwateraanvulling is verwaarloosbaar ten opzichte van de invloed van de putonttrekkingen.

In de periodes dat er geen put actief is, is de invloed wel duidelijk herkenbaar in het stijghoogteverloop in het midden van het terrein (afb. 8).



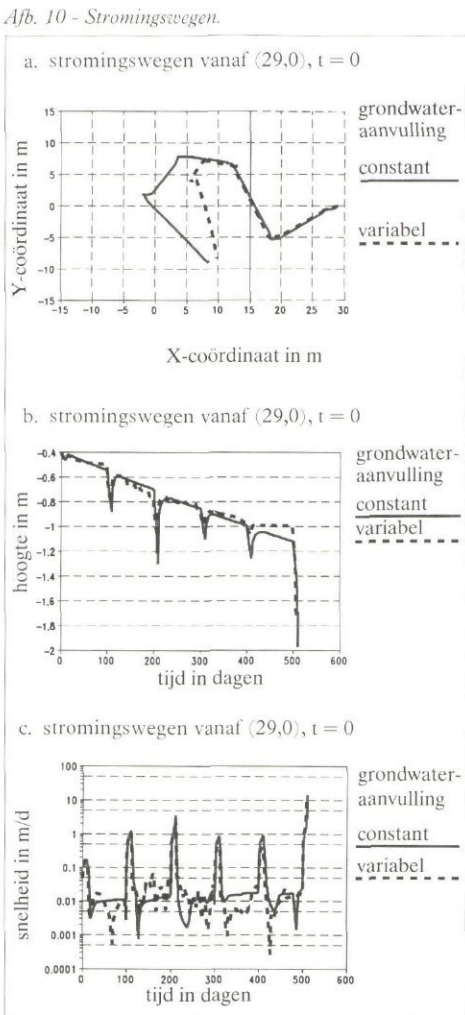
Afb. 8 - Verloop stijghoogte bij variabele grondwateraanvulling.

De flux naar het kanaal wordt relatief wat sterker beïnvloed door de variatie van de grondwateraanvulling dan de stijghoogte (zie afb. 9).



Afb. 9 - Verloop flux naar kanaal bij variabele grondwateraanvulling.

In afbeelding 10 worden de resultaten van twee stromingswegberekeningen getoond. In bovenaanzicht zijn de twee stromingswegen duidelijk verschillend, al zijn beide lijnen vrij glad: de variaties in de grondwateraanvulling veroorzaken praktisch geen kleine horizontale transversale



Afb. 10 - Stromingswegen.

verplaatsingen (afb. 10a). In verticale zin krijgt de stromingsweg in het geval van variabele grondwateraanvulling wel een grilliger verloop (afb. 10b). Tot slot is de grootte van de horizontale snelheid gegeven voor de situatie zonder en met variabele grondwateraanvulling (afb. 10c). In het laatste geval is het verloop weer veel grilliger. De horizontale richting van de snelheidsvector wordt dus relatief weinig beïnvloed door de variabele grondwateraanvulling, in vergelijking met de grootte van de snelheid en de verticale component.

Slot

Uitbreiding van eenvoudige stationaire analytische elementen modellen met tijdsafhankelijke stroming is zeer goed mogelijk. De opzet van een tijdsafhankelijk model wijkt weinig af van die van een stationair model. Het programma ST is geschreven in FORTRAN 77 met enige extensies die deel uit maken van FORTRAN 90. Voor de grafische uitvoer is gebruik gemaakt van routines van de ANSI-standaard GKS ('Graphical Kernel System'). Het draait onder DOS in het conventionele geheugen.

De berekeningen werden uitgevoerd met versie 6.0 van MS-DOS op een COMPAQ met 486DX 33MHz processor. De reken-tijd voor de volledige berekening met constante grondwateraanvulling bedroeg 9 minuten inclusief het aanmaken van vier grids voor het maken van isohypsen-plaatjes als in afbeelding 4. Het bepalen van de oplossing van t=0 tot t=1200d vroeg 1 minuut; de grids van 1580 punten elk voor de tijdstippen t=100, t=200, t=300 en t=400 respectievelijk 1, 2 en 3 minuten.

Voor de berekening met variabele grondwateraanvulling was het totaal 46 minuten, waarbij de oplossing 2 minuten en de grids 2, 3, 5 en 6 minuten vroegen.

Literatuur

Bear, Jacob and Verruijt, Arnold (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. D. Reidel, Dordrecht.

Fitts, Charles R. (1989). *Simple Analytic Functions for Modeling Three-Dimensional Flow in Layered Aquifers*. Water Resources Research, jaargang 25, pagina 943-948, mei 1989.

Fitts, Charles R. (1991). *Modeling 3-D Flow About Ellipsoidal Inhomogeneities With Application to Flow to Gravel-Packed Well and Flow Through Lens-Shaped Inhomogeneities*. Water Resources Research, jaargang 27, pagina 815-824, mei 1991.

Allan Freeze, R. and Cherry, John A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, USA, 1979.

H₂O (1994). *NAGROM voor zoet-Nederland*. H₂O (27) 1994, pagina 199-201.

Literatuur

Achtienribbe, G. E. (1993). *De mogelijkheden en de wenselijkheid van besparing op het huishoudelijk waterverbruik*. Verwarming en Ventilatie nr 8, pp 581-584.
Achtienribbe, G. E. (1992). *De Nederlander en zijn waterverbruik*. H₂O, 25 nr 21, pp. 593, 596.
Kooreman, P. (1993). *De prijsgevoeligheid van huishoudelijk waterverbruik*. Economisch Statistische Berichten, 78, pp. 181-183.
Leeuw, E. de (1994). *De invloed van de spaardouche op het energieverbruik*. LU, Vakgroep Huishoudstudies, Wageningen.
NIPO (1993). *Het waterverbruik thuis*. Eindrapport nr T-353.
Rond, F. (1994). *Douchegedrag: meten is weten ?!*. LU, Vakgroep Huishoudstudies, Wageningen.

Summaries

- End of page 749.

age of 40 use in the mean more than 40 l. water each shower, while respondents over 40 years old can shower with less than 2/3 of that amount. The difference between water use with a water saving shower head and a normal shower head is not as much as generally expected: 5,35 l/min compared to 8,67 l/min. The length of the showering is not dependant on the shower head. When registered data are compared to diary data, it shows that people note 31% more showering time than registered. Respondents also tend to forget to note down a shower in the diary. Diary data are easier to obtain than registered ones, but they give far less accurate numbers.

H₂O (28) 1995, nr. 25; 770

P. J. T. VAN BAKEL and P. A. J. W. DE WIT:

Is the increase in agricultural yields one of the causes of the man-induced-drought in the Netherlands?

The increased agricultural yields are sometimes mentioned as one of the causes of the so-called background man-induced- drought. According to the theory, an increase in agricultural yields is accompanied by an increase in transpiration, which has a lowering effect on the groundwater levels. To proof this theory, simulations have been carried out using the agrohydrological model SWACROP. The increase in agricultural production of potatoes of 40%, in the period 1955-1987, and its effects on transpiration and groundwater levels, were simulated in three ways:

- a. The *inverse-method*, in which the relation between transpiration and dry matter production was inverted.
- b. The *LAI-method*. The size of leaf area was decreased until the dry matter production was reduced with 40%.
- c. The *expert-method*. The established extension of the growing season and the increased nitrogen gifts were modelled.

The calculated increase of the average annual evapotranspiration in 1987 compared to 1955 is, according to the three used methods, 22% (76 mm), 23% (74 mm) and 13% (43 mm) respectively, using 1987 as reference year. The last two methods were used to calculate the lowering of the average annual groundwater level and the average lowest groundwater level for a podzolic soil and groundwater depth class VI. The results were 9 and 24 cm respectively, according to the *LAI-method* and 5 and 13 cm respectively, according to the *expert-method*. The water balance data of the Noordoostpolder for the years 1951 until 1984 showed an increase of the annual evapotranspiration of 69 mm (20% compared to 1984). Thus, the observed water balance results support the theoretical SWACROP results.

Grondwaterstroming

- Vervolg van pagina 765.

Haitjema, H. M. and Strack, O. D. L. (1985). *An Initial Study of Thermal Energy Storage in Unconfined Aquifers*. Report of work done pursuant to contract B-E1234-A-0 with Pacific Northwest Laboratories, Battelle Memorial Institute. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, Minneapolis MN, USA, November 1985.
Haitjema, Henk M. (1985). *Modeling Three-Dimensional Flow in Confined Aquifers by Superposition of Both Two- and Three-Dimensional Analytic Functions*. Water Resources Research, jaargang 21, pagina 1557-1566, oktober 1985.
Haitjema, H. M. and Kraemer, S. R. (1988). *A New Analytic Function for Modeling Partially Penetrating Wells*. Water Resources Research, jaargang 24, pagina 683-690.
Lange, W. J. de (1991). *NAGROM, een landsdekkend instrument voor grondwaterbeleid en -beheer*. H₂O (24) 1991, pagina 450-455.
Strack, O. D. L. and Haitjema, H. M. (1981a). *Modeling Double Aquifer Flow Using a Comprehensive Potential and Distributed Singularities: 1. Solution for Homogeneous Permeability*. Water Resources Research, jaargang 17, pagina 1535-1549.
Strack, O. D. L. and Haitjema, H. M. (1981b). *Modeling Double Aquifer Flow Using a Comprehensive Potential and Distributed Singularities: 2. Solution for Inhomogeneous Permeabilities*. Water Resources Research, jaargang 17, pagina 1551-1560.
Strack, O. D. L. (1984). *Three Dimensional Streamlines in Dupuit-Forchheimer Models*. Water Resources Research, volume 20, pages 812-822.
Strack, O. D. L. (1989). *Groundwater Mechanics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, USA.
Theis, C. V. (1935). *The Relation Between The Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage*, Transactions American Geophysical Union. Reports and Papers Hydrology.
Zaadnoordijk, W. J. (1988). *Analytic Elements for Transient Groundwater Flow*. Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis MN, USA.
Zaadnoordijk, W. J. and Strack, O. D. L. (1993). *Area Sinks in the Analytic Element Method for Transient Groundwater Flow*. Water Resources Research, volume 29, pages 4121-4129, December 1993.

Nogmaals afkijken in India

Het artikel 'afkijken loont in India' in H₂O nr. 23 bevat een aantal onvolkomenheden. In het artikel wordt de indruk gewekt dat het project door Haskoning en het Indiase bureau Iramconsult is uitgevoerd. Het project is evenwel uitgevoerd door een consortium bestaande uit Haskoning, Euroconsult/Grontmij en de Indiase bureaus AIC en Iramconsult. Het technische aandeel van Euroconsult/Grontmij was gelijk aan dat van Haskoning. Het ontwerp voor de UASB zuivering voor Kanpur-Zuid is niet aan Haskoning opgedragen, maar zal binnenkort door het ministerie van Buitenlandse Zaken (DGIS) worden aanbesteed.

Bodemonderzoek Jannezeand gestart

In opdracht van NV Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch is de firma Mos uit Rhoon deze week begonnen met een uitgebreid onderzoek naar de bodemgesteldheid in de polder Jannezeand. In een raster van 250 meter bij 250 meter worden circa 100 sonderingen tot een diepte van circa 40 meter gemaakt. Daarnaast worden twee zeer diepe sonderingen tot 80 à 100 meter diep uitgevoerd. De sonderingen zijn nodig om een beter inzicht te krijgen in de verschillende lagen van de bodem. Hierdoor kan de manier van aanleg en de uiteindelijke diepte van het toekomstige spaarbekken berekend worden.

Vervolgens worden ook op drie plaatsen pompproeven uitgevoerd. Op iedere plaats wordt één week lang water uit de bodem gepompt. De effecten hiervan worden in een groot aantal peilputten gemeten, zodat de doorlatendheid van de zandlagen kan worden berekend. Hiermee kan vervolgens worden voorspeld welke effecten het toekomstige spaarbekken Jannezeand op de omgeving zal hebben. Tenslotte zullen in de directe omgeving van het Jannezeand een aantal peilbuizen geplaatst worden om de huidige situatie, zonder spaarbekken, nauwkeurig vast te leggen. De exacte plaats van de peilbuizen wordt in de komende weken in overleg met de grondeigenaren en -gebruikers bepaald. Met dit meetnet kan vervolgens gedurende meerdere jaren de ongestoorde toestand worden gemeten. De werkzaamheden voor het sonderen, de pompproeven en het plaatsen van peilbuizen duren enkele maanden. Vanaf maart 1996 wordt het bodemonderzoek afgerond met laboratoriumproeven en modelberekeningen. (Persbericht WBB)

Conferentie 'Analytic based modeling of groundwater flow'

Het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en TNO Grondwater en Geoenergie organiseren een internationale conferentie over analytisch gebaseerd modelleren van grondwaterstroming. De conferentie vindt plaats van 7 tot en met 11 april 1996 in hotel Vennendal, Nunspeet.

Nadere inlichtingen: Conferentie-secretariaat, Buerweg 51, 1861 CH Bergen, telefoon 072 - 589 90 62.