
Ontwerp spaarbekken Janneezand

Optimalisatie van geohydrologische proeven bij grote projecten

ir. T.H. van Wee
ir. J.M.J. Waals
ir. A.P. Salverda

Samenvatting

De (geo)hydrologie speelt vaak een belangrijke rol in grootschalige infrastructurele projecten. Bij het ontwerp van deze projecten worden uitgebreide hydrologische studies uitgevoerd om vooraf de effecten op de omgeving te kunnen bepalen. Deze studies bestaan veelal uit een modelstudie, vooraf gegaan door een hydrologisch veldonderzoek. Aan een ontwerp worden eisen gesteld: met welke nauwkeurigheid moeten de effecten worden bepaald. Hier vanuit terugredenerend kan vervolgens worden vastgesteld hoe nauwkeurig de geohydrologische parameters dienen te worden bepaald. Deze nauwkeurigheidseisen vormen dus het startpunt voor de invulling van het hydrologisch veldonderzoek.

In dit artikel wordt een gestructureerde aanpak gepresenteerd om het hydrologisch veldonderzoek resultaatgericht en zo optimaal mogelijk in te vullen. Als voorbeeld wordt het ontwerp van het spaarbekken Janneezand nabij de Biesbosch beschreven. Na vergelijking van verschillende soorten proeven is gekozen voor het uitvoeren van drie pompproeven, waarvan één in het 2^e en twee in het 1^e watervoerend pakket. De interpretatie van de pompproeven hebben de benodigde geohydrologische parameters opgeleverd met een bijbehorend betrouwbaarheidsinterval. Aan de hand van de gevonden betrouwbaarheidsintervallen kon worden geconcludeerd dat bij de ontwikkeling van het definitief ontwerp is voldaan aan de vooraf gestelde eisen.

1 Inleiding

Grootschalige infrastructurele projecten hebben vaak een grote invloed op de (geo)hydrologie. Omgekeerd bepaalt de geohydrologie de ontwerpparameters. Het is daarom van belang om de effecten op grond- en oppervlaktewater goed in te kunnen schatten. In het kader van

ir. T.H. van Wee en ir. A.P. Salverda zijn werkzaam bij Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v., Postbus 233, 7400 AE Deventer, telefoon: (0570) 697911, fax: (0570) 697344, e-mail: t.vwee@witbo.nl of a.salverda@witbo.nl

ir. J.M.J. Waals is werkzaam bij N.V. Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch, Postbus 61, 4250 DB Werkendam, telefoon: (0183) 502144, fax: (0183) 504906, E-mail: nvwbb@pi.net

deze projecten worden omvangrijke hydrologische studies uitgevoerd. Hiertoe wordt meestal allereerst hydrologisch veldonderzoek uitgevoerd om relevante geohydrologische parameters te bepalen. Vervolgens worden met een (model)studie de effecten op grond- en oppervlaktewater bepaald. Het hydrologisch veldonderzoek en de modelstudie dienen uiteraard nauw op elkaar aan te sluiten.

Vooraf de invulling van het veldonderzoek met bijvoorbeeld geohydrologische proeven is een kostbare zaak. Het is van belang de eisen aan dit onderzoek zodanig te formuleren dat de effecten voldoende nauwkeurig worden bepaald zonder onnodig in details te treden (kostenoptimalisatie). In dit artikel wordt een gestructureerde aanpak beschreven voor de invulling van het hydrologisch veldonderzoek. Onderdeel hiervan is het formuleren van de doelstellingen van dit onderzoek en het selecteren van de meest optimale proeven voor de uitvoering hiervan.

De aanpak wordt toegelicht aan de hand van het hydrologisch onderzoek voor het definitief ontwerp van het spaarbekken Jannezand nabij de Biesbosch. Dit onderzoek is uitgevoerd door Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v. in opdracht van N.V. Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch.

2 Aanleg spaarbekken Jannezand

De aanleg van het vierde spaarbekken Jannezand is noodzakelijk als gevolg van de groeiende vraag naar drinkwater en het beleid om de winning van grondwater te beperken. Tijdens de aanleg van het huidige bekkensysteem (De Gijster, Honderd en Dertig en Petrusplaat) is hiervoor de locatie Zuiderklip gereserveerd (zie afbeelding 1). Vanwege de hoge natuurwaarden van het Nationaal Park De Biesbosch is op basis van de resultaten van het 'MER uitwerkingsplan vierde spaarbekken' gekozen voor een alternatieve locatie buiten de Biesbosch, te weten Jannezand (Salverda e.a., 1996).

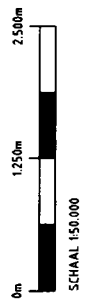
Principewerking

Het spaarbekken Jannezand heeft een voorraadfunctie waarbij het peil in het bekken kan variëren. Daarbij worden twee situaties onderscheiden (zie afbeelding 2). In de ene situatie is sprake van een relatief hoog peil in het bekken. Door het hogere peil zal water vanuit het bekken naar de omgeving wegzijgen. Dit resulteert in kwel naar de omringende polders. Deze situatie treedt het grootste deel van het jaar op.

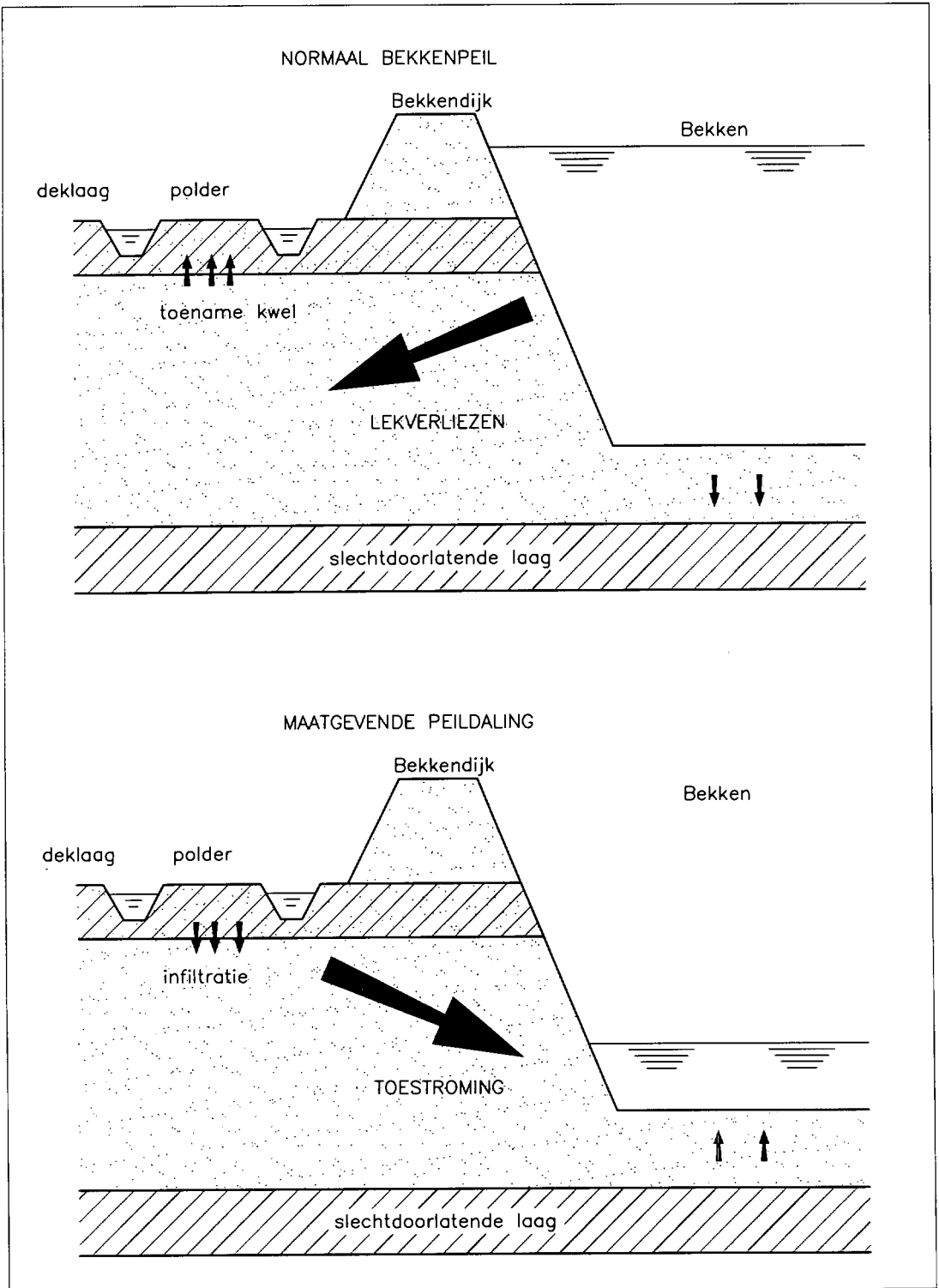
In de tweede situatie is er sprake van een laag peil. Deze situatie treedt slechts incidenteel op gedurende de periode dat de aanwezige voorraad in het bekken wordt aangesproken (innamestop). Bij een laag peil tijdens een innamestop treedt een omgekeerde situatie op waarbij sprake is van toestroming van grondwater vanuit de omgeving naar het bekken.

Geohydrologische schematisatie

De ondergrond ter plaatse van het spaarbekken Jannezand wordt gekenmerkt door kwartaire en tertiaire afzettingen van grote dikte. Op basis van beschikbare literatuurgegevens, aangevuld met sonderingen en boringen tot NAP -80 m à NAP -100 m is de ondergrond geohydrologisch geschematiseerd (zie tabel 1).



Afbeelding 1: Overzicht spaarbekkens Biesbosch



Afbeelding 2: Principewerking spaarbekken

Tabel 1: Stratigrafie, lithologie en geohydrologische schematisatie

Geologische Formatie	Gemiddelde diepte m t.o.v. NAP	Lithologie	Geohydrologische schematisatie
Westland-Formatie	+0,5 à -6	klei en veen met een zandlaag	deklaag of 1 ^e scheidende laag
Formatie van Sterksel	-6 à -28	(matig) grove zanden met grind	1 ^e watervoerend pakket
Formatie van Kedichem	-28 à -36	kleilagen	2 ^e scheidende laag
	-36 à -44	(matig) fijne zanden	2 ^e watervoerend pakket
	-44 à -60	matig fijne tot grove zanden	
Formatie van Tegelen	-60 à -65	kleilagen met afgeronde klei-stenen	3 ^e scheidende laag
	-65 à -100	matig fijne tot grove zanden	
Formatie van Maassluis	-100 à -130	fijne/grove schelphoudende zanden	3 ^e watervoerend pakket
	-130 à -150	kleilagen	4 ^e scheidende laag
Formatie van Oosterhout	-150 à -300	fijne slibhoudende zanden en klei, schelpbanken	4 ^e watervoerend pakket
Formatie van Breda	<-300	fijne glauconiet-houdende zanden	
		zandige klei en klei	basis

(Geo)hydrologische effecten

Bij de aanleg van het spaarbekken Jannezand wordt de deklaag en een groot deel van het 1^e watervoerend pakket weggegraven. Vervolgens wordt een afwijkend peilbeheer gevoerd, waar het bekkenpeil varieert tussen NAP +3,5 m (Normaal Zomer Peil) en NAP -13,5 m (Maatgevende Peildaling). Voor de hydrologische studie is onderscheid gemaakt naar effecten ten behoeve van de ontwerp-aspecten en de geohydrologische effecten op de omgeving (zie tabel 2).

Tabel 2: Ontwerp-aspecten en geohydrologische effecten

Ontwerp-aspecten	Van belang voor
Maximale ontgravingsdiepte van het spaar-bekken	Nuttige bergingsvolume van het spaarbekken en winbare hoeveelheid zand
Lekverlies uit het spaarbekken	Energiekosten pompstations
(Geo)hydrologische effecten omgeving	Van belang voor
Wijziging freatische grondwaterstand	Grondwateroverlast bebouwing Hank Vernattingschade landbouw Zettingsrisico's tijdens een peildaling Droogteschade landbouw tijdens een peildaling
Wijziging stijghoogte 1 ^e wvp en verticale flux	Toename uitmalingsdebiet poldergemalen Aanpassing ont- en afwateringsstelsel

3 Formuleren doelstelling hydrologisch veldonderzoek

Voordat wordt gestart met de hydrologische studie dient te worden vastgesteld welke eisen aan het ontwerp worden gesteld: met welke nauwkeurigheid dienen de ontwerp-aspecten en de geohydrologische effecten te worden bepaald? Van hieruit terugredenerend kan vervolgens worden vastgesteld hoe nauwkeurig de geohydrologische parameters dienen te worden vastgesteld (voor het uitvoeren van de modelstudie). Deze eisen worden geformuleerd in het Programma van Eisen.

Ontwerp-aspecten

De maximale ontgravingsdiepte is van belang voor bepaling van het vereiste nuttige volume van het bekken en de winbare hoeveelheid zand. De maximale ontgravingsdiepte is afhankelijk van het opbarstgevaar van de kleilaag behorend tot de Formatie van Kedichem tijdens een Maatgevende Peildaling. Dit wordt naast geotechnische parameters bepaald door de maatgevende stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket en de dikte van deze kleilaag. Uitgangspunt is dat de stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket voor maatgevende situaties tot op 0,5 m nauwkeurig dient te worden vastgesteld. Dit is toereikend om de ontgravingsdiepte binnen een bandbreedte van circa 0,5 m te berekenen.

Voor een goede schatting van de energiekosten dient het lekverlies uit het spaarbekken tot op circa 10% nauwkeurig te worden bepaald.

Geohydrologische effecten

Voor het bepalen van de geohydrologische effecten in de omgeving wordt uitgegaan van de volgende vereiste nauwkeurigheden:

- 1 mm/dag voor de wijziging van de verticale flux;
- 0,1 meter voor de wijziging van de freatische grondwaterstand;
- 0,5 meter voor de stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket.

Deze nauwkeurigheid is toereikend voor een goede inschatting van de afgeleide effecten zoals zettingschade, landbouwschade, wateroverlast en toename van het uit te malen debiet in de polder.

Doelstelling

Het Programma van Eisen vormt het uitgangspunt voor het hydrologisch veldonderzoek. Om de hydrologische effecten met een modelstudie te berekenen, moeten allereerst de geohydrologische parameters worden vastgesteld. Voor het invullen van het hydrologisch veldonderzoek moet worden vastgesteld welke geohydrologische parameters relevant zijn en met welke nauwkeurigheid deze bepaald moeten worden.

Vooraf is een grondwatermodel ontwikkeld op basis van regionale parameterwaarden uit de literatuur (Salverda e.a, 1996). Door een gevoeligheidsanalyse met dit model is de gevoeligheid van de afzonderlijke parameters op de ontwerp-aspecten en de geohydrologische effecten berekend. Met deze gevoeligheidsanalyse zijn op basis van het Programma van Eisen de vereiste nauwkeurigheden van de geohydrologische parameters ter plaatse van de locatie Jannezand vastgesteld (zie tabel 3).

Tabel 3: Vereiste nauwkeurigheid geohydrologische parameters

Parameter	Vereiste nauwkeurigheid
Intreeweerstand Jeppegat (C_{intree})	40%
Weerstand deklaag (c_1)	40%
Doorlaatvermogen 1 ^e watervoerend pakket (kD_1)	15%
Bergingscoëfficiënt 1 ^e watervoerend pakket (S_1)	30%
Weerstand 2 ^e scheidende laag (Formatie van Kedichem) (c_2)	15%
Doorlaatvermogen 2 ^e watervoerend pakket (kD_2)	15%
Bergingscoëfficiënt 2 ^e watervoerend pakket (S_2)	30%
Weerstand 3 ^e scheidende laag (Formatie van Tegelen) (c_3)	nauwelijks
Doorlaatvermogen 3 ^e watervoerend pakket (kD_3)	25%
Bergingscoëfficiënt 3 ^e watervoerend pakket (S_3)	-

4 Invulling hydrologisch veldonderzoek: keuze geohydrologische proeven

Voor het vaststellen van de geohydrologische parameters kunnen verschillende soorten van proeven worden uitgevoerd. Hierbij kan bijvoorbeeld onderscheid worden gemaakt naar:

- a simulatieproeven;
- b pompproeven;
- c stijghoogteanalyses, bijvoorbeeld in relatie tot getijvariaties op een rivier.

Ad a

Met een simulatieproef wordt de ingreep (op beperkte schaal) in een praktijksituatie nagebootst. De effecten van de werkelijke ingreep kunnen vervolgens worden geëxtrapoleerd met de gevonden resultaten. In principe is het mogelijk om een simulatieproef uit te voeren

met één van de bestaande spaarbekkens, bijvoorbeeld met De Gijster. Qua omvang, grootte en ingreep op de omgeving komt deze proef overeen met de toekomstige situatie van een spaarbekken op de locatie Jannezand.

Ad b

Pompproeven hebben een relatief groot invloedsgebied (enkele kilometers rond de pompput) waarbij geohydrologische parameters in de diverse bodemlagen kunnen worden bepaald. Pompproeven kunnen in diverse watervoerende pakketten worden uitgevoerd. De verlagingen worden in, boven en onder het gepompte pakket gemeten, zodat het doorlaatvermogen en de bergingscoëfficiënt alsmede de weerstand van de onder- en bovenliggende weerstand-biedende laag het meest nauwkeurig kunnen worden afgeleid.

Ad c

Getijvariaties in een rivier planten zich voort in de watervoerende pakketten. Deze peilvariaties werken gedempt en vertraagd door in de stijghoogten. Uit de stijghoogteanalyse kunnen de demping en vertraging worden vastgesteld. De mate van demping en faseverschuiving zijn afhankelijk van de geohydrologische parameters.

Bij de keuze van de geohydrologische proeven is rekening gehouden met:

- het invloedsgebied;
- de te interpreteren parameters (aantal en pakket);
- de hydrologische randvoorwaarden;
- de geohydrologische opbouw.

Het bij wijze van proef verlagen van het bekkenpeil in De Gijster is uit oogpunt van bedrijfsvoering niet acceptabel. De grootte van het invloedsgebied van de pompproeven heeft globaal een zelfde schaalgrootte als het spaarbekken. Daarom is primair gekozen voor het uitvoeren van pompproeven. Daarnaast is de betrouwbaarheid van pompproeven groot. Doordat parameterwaarden van verschillende slecht en goed doorlatende lagen moeten worden bepaald, zijn meerdere proeven noodzakelijk.

Met de pompproeven moeten de parameters tegen zo gering mogelijke kosten worden vastgesteld. Door de benodigde diepe boringen zijn pompproeven relatief duur. De vast te stellen parameterwaarden liggen voornamelijk in en om het 1^e en 2^e watervoerend pakket waardoor pompproeven in deze pakketten voor de hand liggen (zie tabel 4). Hieronder wordt ingegaan op de optimalisatie van de proeven.

Noodzaak pompproeven 1^e watervoerend pakket

In de situatie met Normaal Peil zal het water uit het spaarbekken via het 1^e watervoerend pakket naar de omgeving wegzijgen. Deze horizontale stroming wordt hoofdzakelijk bepaald door het doorlaatvermogen van het 1^e watervoerend pakket op de rand van het spaarbekken. Het doorlaatvermogen in het midden van het spaarbekken is minder interessant, omdat hier het grootste deel van het 1^e watervoerend pakket wordt weggegraven.

Vanwege verschillende randvoorwaarden van het spaarbekken zijn twee pompproeven in het 1^e watervoerend pakket uitgevoerd (zie afbeelding 3). De locatie Heuvelweg is representatief voor een polder als randvoorwaarde, de locatie Jpeggat voor een kreek. Met de

pompproeven in het 1^e watervoerend pakket zijn de parameters bepaald die van belang zijn voor de geohydrologische effecten op de omgeving (c_1 , c_{intree} , kD_1 , S_1).

Noodzaak pompproef 2^e watervoerend pakket

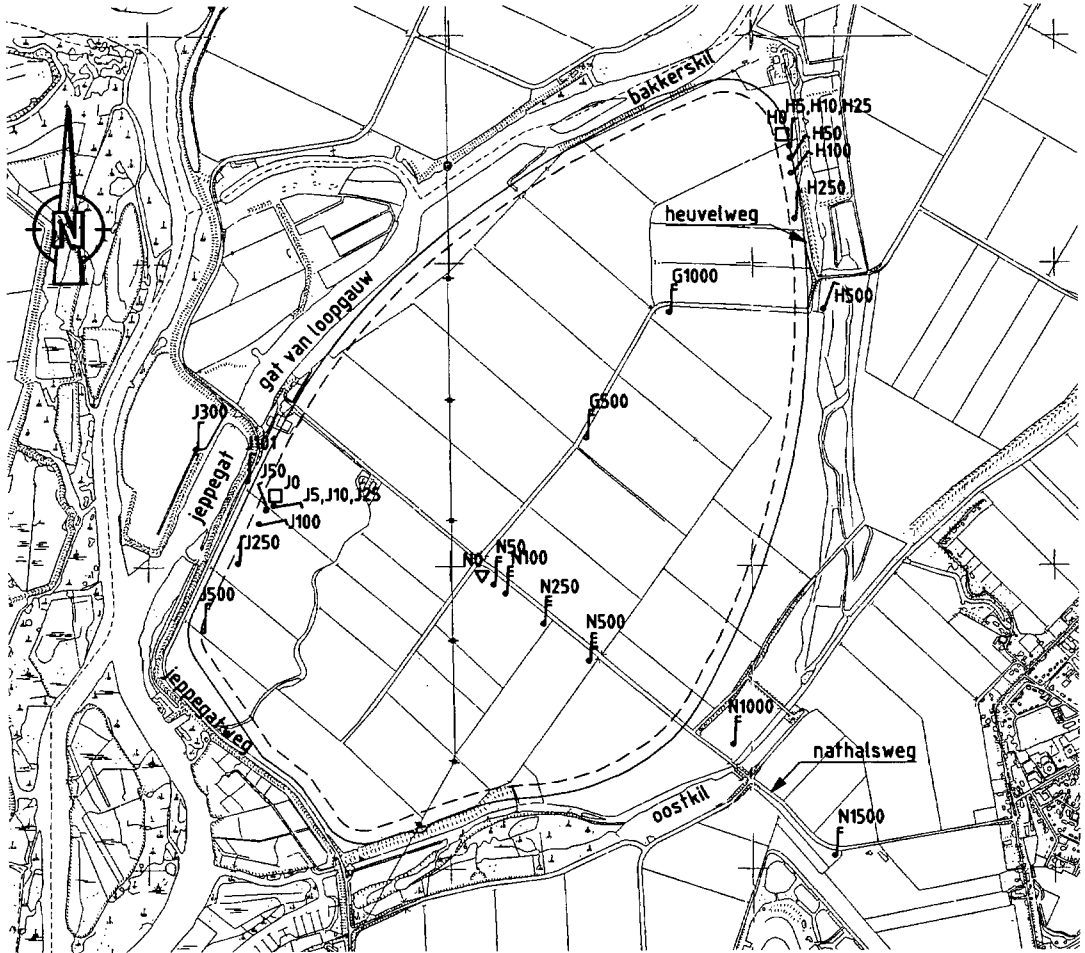
Op de plaats waar de kleilaag behorend tot de Formatie van Kedichem de grootste hydraulische weerstand heeft, zal bij een peildaling het stijghoogteverschil tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket het grootst zijn. De grootste weerstand wordt verwacht op die locatie waar de kleilaag het dikst is (immers $c = D/k_v$), ervan uitgaande dat de verticale doorlatendheid niet varieert. Op deze locatie is het opbarstgevaar het grootst. Naast het stijghoogteverschil en de dikte is het volumegewicht ook van belang in het opbarstproces. Uitgevoerde sonderingen en boringen hebben vooraf inzicht gegeven in de ligging en dikte van de kleilaag. De kleilaag heeft overwegend een dikte van circa 10 meter. In het noorden van de polder Jannezand is de ligging verstoord door een oergeul van de Rijn die een oost-west strekking heeft. In deze geul van circa 200 meter breedte ontbreekt de kleilaag nagenoeg en is de geul grotendeels opgevuld met zand.

Op basis van deze voorkennis is de proef in het 2^e watervoerend pakket uitgevoerd op de locatie waar de kleilaag duidelijk aanwezig is met een dikte van circa 10 meter (locatie Nathalsweg, zie afbeelding 3). Met de pompproef in het 2^e watervoerend pakket zijn de geohydrologische parameters bepaald die van belang zijn voor de ontwerp-aspecten (kD_2 , c_2 , S_2 , kD_3 , c_3).

Het is overwogen om een pompproef in het 2^e watervoerend pakket uit te voeren ter plaatse van de verstoorde zone. Vanwege de lage (verwachte) weerstand van de restanten van de kleilaag zal de stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket kleiner zijn en hierdoor minder maatgevend voor het opbarstgevaar. Door het niet uitvoeren van deze proef wordt ter plaatse van de verstoring met betrekking tot de parameter c_2 niet aan de geformuleerde nauwkeurigheidseisen voldaan. De c_2 -waarde op deze locatie is berekend als het product van de dikte (bepaald uit sonderingen) en de weerstand per meter (bepaald uit de andere proef). Dit is een 'veilige' benadering. Gezien de relatief geringe omvang van de verstoorde zone is een lagere nauwkeurigheid acceptabel.

5 Uitvoering pompproeven

Met het ontwikkelde grondwaterstromingsmodel zijn simulaties uitgevoerd van de pompproeven. Hiermee zijn het optimale debiet, de waarneemfrequentie en de meest geschikte locaties van de waarnemingsputten vastgesteld (zie afbeelding 3). De definitieve filterstellingen van de pomp- en waarnemingsputten zijn vastgesteld aan de hand van de veldboorbeschrijvingen en een boorgatmeting. Tabel 4 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van de proeven.



Legenda

- Trace bekendijk
- Pomput in 1e watervoerend pakket
- ▽ Pomput in 2e watervoerend pakket
- ƒ Peilbuis met filter in het 1e+2e+3e watervoerend pakket (2 stuks)
- ƒ Peilbuis met filter in het 1e+2e watervoerend pakket (4 stuks)
- ƒ Peilbuis met filter in het 1e watervoerend pakket (16 stuks) en in de deklaag
- ƒ Peilbuis met filter in het 1e+2e+3e+4e watervoerend pakket



Afbeelding 3: Overzicht locatie pomp- en waarnemingsputten

Tabel 4: Overzicht pompproeven

Locatie	Bepompt pakket	Uitvoeringsduur pompproeven	Onttrekkings-debiet (m ³ /uur)	Putten met filter in wvp			Te bepalen parameters
				0 + 1	1 + 2	1 + 2 + 3	
Jepegat	1 ^e wvp	6 dagen	95	9	-	-	C ₁ , C _{intree} , kD ₁ , S ₁
Heuvelweg	1 ^e wvp	6 dagen	105	7	-	-	C ₁ , kD ₁ , S ₁
Nathalsweg	2 ^e wvp	14 dagen	160	-	4	3	C ₂ , kD ₂ , C ₃ , kD ₃ , S ₂ (S ₃)

De uitvoering bestond uit een proefstart, een pompproef en een stopproef. Doel van de kortdurende proefstarts was om de prognose van de stijghoogteveranderingen aan de werkelijkheid te toetsen en tevens een generale repetitie te houden voor de uitvoering van de geohydrologische proeven. Tijdens de pompproef is onttrokken totdat de stationaire eindverlaging was bereikt. Tijdens de stopproef is het herstel van de stijghoogte gemeten. De proeven op de drie locaties zijn na elkaar uitgevoerd met tussenpauzes van circa 2 weken om mogelijke onderlinge beïnvloeding te voorkomen.

Tijdens de proeven zijn de luchtdruk, de neerslag en het oppervlaktewaterpeil in het Jepegat gemeten. Deze waarnemingen zijn zowel vooraf, tijdens als na de proeven verricht. De metingen voor en na de proeven hebben een goed inzicht gegeven in de uitgangssituatie en de fluctuaties van de stijghoogte door externe factoren.

De waarnemingen zijn verricht met automatisch registrerende opname-apparatuur. De stijghoogte, de luchtdruk en het oppervlaktewaterpeil in het Jepegat zijn gemeten met peilbuis-dataloggers (DIVER). De neerslag is automatisch geregistreerd met een 'tipping bucket'-regenmeter. De opgepompte debieten ten behoeve van de pompproeven zijn frequent gemeten met een elektromagnetische debietmeter.

6 Resultaten

Correctie van de waarnemingen

Tijdens de uitvoering van de pompproeven is het niet te voorkomen dat externe factoren een storende invloed uitoefenen op de gemeten stijghoogteveranderingen. De natuurlijke stijghoogteveranderingen worden veroorzaakt door luchtdrukveranderingen, verandering van grondwateraanvulling door neerslag en verdamping en peilvariaties in het Jepegat. Deze peilvariaties zijn enerzijds het gevolg van getij dat zich via de Nieuwe Waterweg, de Oude Maas, de Dordtsche Kil en de Bergsche Maas voortplant. Het zon- en maangetij op het Jepegat veroorzaakt peilvariaties van circa 0,3 meter en heeft een periode van ongeveer 12,4 uur (dubbeldaagsgetij). Anderzijds treden peilvariaties op door veranderde rivierafvoeren op de Bergsche Maas. Dergelijke afvoergolven zijn langdurig en komen onregelmatig voor. Peilvariaties in het Jepegat zijn tot op een afstand van circa 500 meter van het Jepegat duidelijk waarneembaar in de stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket.

Dankzij het gebruik van DIVERS voor het registreren van barometrische drukken was het eenvoudig om de eveneens met DIVERS gemeten stijghoogten hiervoor te corrigeren. Op basis van neerslagmetingen en verdampingscijfers kon worden vastgesteld dat de fluctuatie in de grondwateraanvulling tijdens de pompproefperioden verwaarloosbaar was.

Voor een goede interpretatie is het noodzakelijk om de gemeten stijghoogteveranderingen te corrigeren voor externe factoren (natuurlijke fluctuaties). Hiervoor kunnen twee methoden worden gehanteerd:

- 1 aan de hand van reconstructieberekeningen;
- 2 aan de hand van het stijghoogteverloop van een referentiepeilbuis buiten het invloedsgebied.

Het blijkt dat stijghoogteveranderingen in de directe omgeving tot het Jeppegat hoofdzakelijk worden veroorzaakt door peilvariatie op het Jeppegat. De stijghoogte vertoont net als het getij een cyclische beweging. De mate van demping en faseverschuiving zijn afhankelijk van de *afstand* tot het Jeppegat. Hierdoor is het niet mogelijk met een referentiepeilbuis te werken. Daarom zijn de gemeten stijghoogteveranderingen van de proef op de locatie Jeppegat gecorrigeerd aan de hand van reconstructieberekeningen. In het intermezzo wordt de gebruikte reconstructiemethode beschreven.

Voor de correctie van de stijghoogteveranderingen van de proeven op de locatie Heuvelweg en Nathalsweg is wel gebruik gemaakt van een referentiepeilbuis, omdat op deze locaties het getij nagenoeg is uitgedempt.

Interpretatie proeven

De correctie van de stijghoogtewaarnemingen resulteert in stijghoogteveranderingen die alleen het gevolg zijn van de proeven (zie als voorbeeld afbeelding 4). De gecorrigeerde stijghoogteveranderingen zijn niet-stationair geïnterpreteerd met het analytisch computerprogramma MLU (Hemker, 1994) waarbij rekening is gehouden met voeding door oppervlaktewater uit het Jeppegat. De intreeweerstand van het Jeppegat is hierbij berekend met behulp van de putfactor-analyse (Timmerman en Hemker, 1993).

De pompproeflocaties liggen relatief dicht bij elkaar. Hierdoor kunnen parameterwaarden op één pompproeflocatie worden gebruikt op een andere proeflocatie. Dit betrof de terugkoppeling van de resultaten van de proeven in het 1^e watervoerend pakket en het resultaat van de proef in het 2^e watervoerend pakket. Bij de interpretatie naar parameters op een pompproeflocatie is dus op iteratieve wijze rekening gehouden met de interpretatieresultaten die gevonden zijn op de andere pompproeflocaties.

Interpretatieresultaten

Het interpretatieresultaat van de gecombineerde proeven is weergegeven in tabel 5. De gevonden parameters zijn gemiddelde waarden binnen het invloedsgebied. De grootse verschillen tussen de beginschattingen en het interpretatieresultaat worden aangetroffen bij scheidende lagen. Deze verschillen worden hoofdzakelijk veroorzaakt doordat de beginschattingen uit de literatuur zijn afgeleid op basis van enkele veraf gelegen pompproefwaarden. Ter plaatse van de locatie verschillen de dikte en samenstelling van de scheidende lagen van de veraf gelegen (pompproef)locaties. Hierdoor verschilt de gevonden weerstandswaarde van de beginschatting.

Intermezzo

De reconstructieberekening bestond uit het bepalen van de getijde-respons van het grondwater in het 1^e watervoerende pakket ten gevolge van de getijbeweging met een sinusvormig verloop op het Jepegat (Bosch, 1951). De beschrijving van de getijde-respons is gegeven voor een eenvoudig Hollands profiel. In dit profiel is sprake van één watervoerend pakket met een afdekkende semi-permeabele laag. Het watervoerend pakket wordt ingesneden door een rivier (het Jepegat) met wisselende waterpeilen. In geval van gedeeltelijk afgesloten grondwater zal de invloed van het getij afnemen met de afstand tot het oppervlaktewater en zal er bovendien een met de afstand toenemende faseverschuiving van het grondwatergetij optreden ten opzichte van het getij in het Jepegat. De grootte van de demping en van de faseverschuiving zijn afhankelijk van de geohydrologische karakteristieken van het watervoerend pakket (doorlaatvermogen en bergingscoëfficiënt), van de hydraulische weerstand van de afdekkende semi-permeabele laag en van de intreeweerstand van het Jepegat.

De getijde-respons-vergelijking kan voor een onveranderd polderpeil en gedeeltelijk afgesloten grondwater uitgedrukt worden in:

$$h_1(x, t) = h_m(W_m) + A_0 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x)$$

waarin:

h_1	=	stijghoogte 1 ^e watervoerend pakket (m);
h_m	=	halftijstand stijghoogte 1 ^e watervoerend pakket (m);
W_m	=	halftijstand waterpeil rivier (m);
x	=	afstand tot de oever van de rivier (m);
t	=	tijd (uren);
A_0	=	amplitude getij (m);
ω	=	$2\pi/T$ (rad/uur);
T	=	periode getij (uren)
α	=	dempingsfactor (m^{-1});
β	=	faseverschuivingsfactor (m^{-1}).

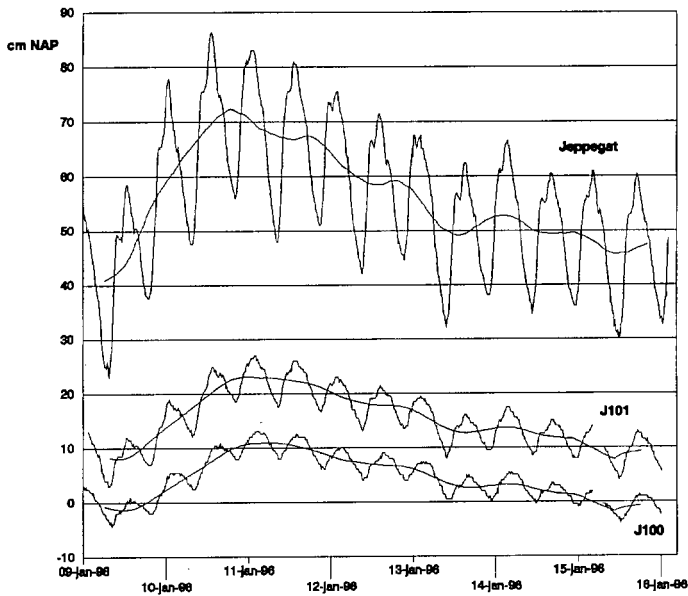
Bij deze getijde-respons-vergelijking is geen rekening gehouden met de intreeweerstand. Uit deze vergelijking volgt dat de amplitude $A_x = A_0 e^{-\alpha x}$ uitdempt met $e^{-\alpha x}$. Op de locatie Jannezand is op een afstand van circa 500 m de invloed van het getij verwaarloosbaar. De faseverschuiving is gelijk aan $\beta x/\omega$.

Voorafgaand aan de pompproeven zijn waarnemingen van de stijghoogte in het watervoerend pakket en het waterpeil in het Jepegat verricht. Hiermee kon met behulp van de berekende halftijstanden de getijde-respons-vergelijking afgeleid worden. De halftijstand is het voortschrijdend gemiddelde over 12,4 uur op tijdstip t . Hiermee kunnen de gemeten standen gecorrigeerd worden voor afvoergolven, zodat alleen de fluctuatie ten gevolge van het getij overblijft. In afbeelding A zijn de gemeten standen en de berekende halftijstanden van het waterpeil in het Jepegat en de stijghoogten in J101 en J100 voor de periode 9 t/m 16 januari 1996 uitgezet. De peilbuizen J101 en J100 liggen respectievelijk op 50 meter en 160 meter afstand van de oever van het Jepegat.

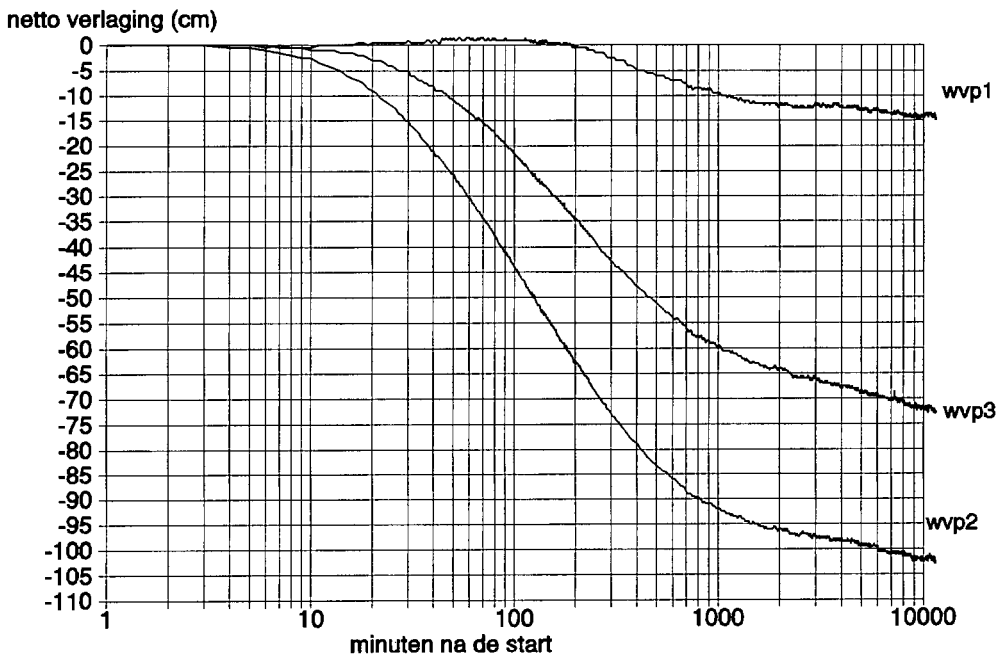
Na analyse van het getij kan na afleiding van A_0 , T , α en β het getij uitgedrukt worden in de volgende vergelijkingen:

- 1 Getijkromme: $W_{\text{Jepegat}} = W_m + 0,150 \sin(0,51 \cdot t)$, $h_{\text{Jepegat}} = h_m \text{ Jepegat} + 0,055 \sin(0,51 \cdot t)$;
- 2 Stijghoogte-getijkromme op 50 meter van de oever: $h_{J101} = h_m \text{ J101} (W_m) + 0,043 \sin(0,51 \cdot t - 0,13)$;
- 3 Stijghoogte-getijkromme op 160 meter van de oever: $h_{J100} = h_m \text{ J100} (W_m) + 0,025 \sin(0,51 \cdot t - 0,38)$.

De relatie tussen W_m en h_m is door middel van lineaire regressie bepaald. Met bovenstaande gegevens kan volgens Bosch ook een kD -waarde worden afgeleid: $kD_1 = \omega S_1 / 2\alpha\beta$. Bij een S_1 van $1,45E-3$ wordt een kD_1 van $645 \text{ m}^2/\text{d}$ berekend, hetgeen in overeenstemming is met het resultaat van de pompproeven.



Afbeelding A: Gemeten standen en berekende halfijstanden



Afbeelding 4: Gecorrigeerde verlagingen pompproef 2^e watervoerend pakket in peilbuis N250

Tabel 5: Interpretatieresultaat

Geohydrologische schematisatie	Beginschatting	Interpretatie-resultaat	Betrouwbaarheidsinterval	Vereiste nauwkeurigheid
1 ^e scheidende laag (deklaag)	$c_1 = 500$ dagen	$c_1 = 610$ dagen	10 %	40 %
	$c_{intree} = 35$ dagen	$c_{intree} = 8$ dagen	45 %	40 %
1 ^e watervoerend pakket	$kD_1 = 1500$ m^2/dag	$kD_1 = 650$ en $1075 m^2/dag$	3 en 10 %	15 %
	$S_1 = 0,001$	$S_1 = 0,0015$	3 %	30 %
	2 ^e scheidende laag	$c_2 = 5000$ dagen	$c_2 = 900$ dagen	12 %
2 ^e watervoerend pakket	$kD_2 = 300 m^2/dag$	$kD_2 = 500 m^2/dag$	2 %	15 %
	$S_2 = 0,0003$	$S_2 = 0,00063$	10 %	30 %
3 ^e scheidende laag	$c_3 = 500$ dagen	$c_3 = 95$ dagen	9 %	-
3 ^e watervoerend pakket	$kD_3 = 800 m^2/dag$	$kD_3 = 450 m^2/dag$	7 %	25 %
	$S_3 = 0,0006$	$S_3 = 0,00027$	20 %	-

7 Conclusie

In dit artikel is een gestructureerde aanpak beschreven voor de invulling van het hydrologisch veldonderzoek bij grootschalige infrastructurele projecten. Hierbij wordt—uitgaande van de eisen die aan het ontwerp worden gesteld—het hydrologisch veldonderzoek ingevuld: het formuleren van de doelstellingen en het selecteren van de meest optimale proeven voor de uitvoering hiervan. Hiermee wordt het veldonderzoek zodanig geformuleerd dat de geohydrologische parameters voldoende nauwkeurig worden bepaald zonder onnodig in details te treden.

Het hydrologisch veldonderzoek voor het spaarbekken Jannezand bestond uit het uitvoeren van twee pompproeven in het 1^e en één in het 2^e watervoerend pakket. Hiermee zijn nauwkeurige en representatieve waarden bepaald voor de relevante geohydrologische parameters. Het resultaat van de pompproeven zijn schattingen van de geohydrologische parameters met een bijbehorend betrouwbaarheidsinterval. Deze zijn representatief voor het invloedsgebied van de pompproeven. De invloedsgebieden van de drie proeven bedekken nagenoeg het oppervlak van het spaarbekken Jannezand, en overlappen elkaar gedeeltelijk. Daarom kan worden gesteld dat de gevonden parameters representatief zijn voor het gehele spaarbekken. Aan de hand van het betrouwbaarheidsinterval kan worden vastgesteld of de parameters binnen de vereiste nauwkeurigheden zijn vastgesteld zoals geformuleerd in het Programma van Eisen voor het hydrologisch onderzoek.

Uit de uitgevoerde proeven blijkt dat de afwijking tussen de beginschatting en het interpretatieresultaat van de pompproeven groot is. Het geeft aan dat een dergelijke aanpak (optimalisatie van geohydrologische proeven) noodzakelijker is dan de meeste opdrachtgevers denken! Immers met onzekere of zelfs onjuiste parameters zijn de berekende geohydrologische effecten onbetrouwbaar en wordt het ontwerp onder- of overgedimensioneerd.

Voor vrijwel alle relevante parameters wordt voldaan aan dit Programma van Eisen. Alleen de intreeweerstand van het Jpeggat is (iets) minder nauwkeurig vastgesteld. Gezien de geringe afwijking heeft dit echter nauwelijks consequenties voor de effectbepa-

ling. Hierdoor is het mogelijk de ontwerp-aspecten (ontgravingsdiepte en lekverlies) en de geohydrologische effecten (wijziging grondwaterstanden, stijghoogten en kwelsituatie) binnen de vooraf gestelde nauwkeurigheid vast te stellen. In de modelstudie zijn de (geo)hydrologische effecten en ontwerp-aspecten gedetailleerd berekend. Voor de resultaten hiervan wordt verwezen naar het artikel hierover (Waals en Salverda, 1997).

Literatuur

- Bosch, H. (1951)** Geohydrologisch onderzoek Bergambacht; in: Hydrologisch Colloquium H.C. nr 255 A.
- Hemker, C.J. (1994)** MLU (Multi-Layer Unsteady State), Microcomputer aquifer test analysis for Unsteady-State Flow in multiple-aquifer systems.
- Salverda, A.P., J.M.J. Waals en A. Biesheuvel (1996)** Geohydrologisch onderzoek voor het vierde Biesbosch-bekken; in : *H₂O*, jrg 29, nr 3, pag 67–70.
- Timmerman, P.H.A. en C.J. Hemker (1993)** Bepaling van de intreeweerstand van de Lek en de verticale weerstanden van de uiterwaarden en polders nabij Langerak (Alblasserwaard); in: *H₂O*, jrg 26, nr 1, pag 2–7.
- Waals, J.M.J. en A.P. Salverda (1997)** Het spaarbekken Jannezand geohydrologisch gezien; in: *H₂O*, jrg 30, nr 22, pag 672–675.