

ANALYSE VAN POMPPROEVEN IN EEN VEELLAGIG GRONDWATERRESERVOIR MET BEHULP VAN EEN MATEMATISCH MODEL

door
L. LEBBE*, K. PEDE** en E. VAN HOUTTE***

64164

SAMENVATTING

Twee pompproeven, uitgevoerd in een veellagig grondwaterreservoir, werden met behulp van een mathematisch model geïnterpreteerd. Bij iedere pompproef werd gepompt op één doorlatende laag van het veellagig grondwaterreservoir en werd de verlaging in alle doorlatende en halfdoorlatende lagen op verschillende afstanden tot de pompput gevolgd. Met de klassieke analytische methode werden uit de verlaging in de aangepompte laag de horizontale hydraulische doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangepompte laag, alsmede de hydraulische weerstanden van de aangrenzende halfdoorlatende lagen afgeleid. Met deze hydraulische parameters, aangevuld met de ingeschatte hydraulische parameters van de andere lagen, werd het verloop van de verlaging in de verschillende lagen gedurende de pompproef berekend voor de verschillende afstanden tot de pompput.

Uit de afwijkingen tussen de gemeten en de berekende verlagingen kon men afleiden hoe de ingebrachte hydraulische parameters moeten worden aangepast. Met deze aangepaste hydraulische parameters werden opnieuw de verlagingen berekend. Dit werd herhaald totdat de berekende en de gemeten verlagingen overeenstemden. Op deze wijze was het mogelijk meer hydraulische parameters af te leiden dan tot nu toe mogelijk was met de klassieke analytische methode. Vooral de verticale doorlatendheid van de aangrenzende lagen werd nauwkeuriger bepaald.

De afgeleide hydraulische parameters hadden echter niet alle dezelfde graad van nauwkeurigheid.

1. INLEIDING

Door LEBBE (1983) werd een mathematisch model van de niet-permanente grondwaterstroming naar een pompput in een veellagig grondwaterreservoir uitgewerkt.

Door middel van de eindig-verschillenadering in een axiaal-symmetrisch tweedimensioneel model kan men de stijghoogte in de verschillende lagen op verschillende afstanden tot de pompput en op verschillende tijdstippen na het aanslaan van de pomp berekenen. De nauwkeurigheid van het model wordt nagegaan door de grondwaterbalans van iedere laag te berekenen.

De verkregen resultaten worden voorgesteld in verlaging-grafieken. Uit de verlagingen kunnen de horizontale en de verticale doorsijpelingssnelheden en de stroomtijden worden berekend. Deze kunnen eveneens tegenover de tijd en de afstand, voor de verschillende lagen, in grafieken worden weergegeven.

Eén van de doelstellingen van het mathematisch model is de analyse en interpretatie van pompproeven. Daarbij worden niet enkel de stijghoogteverlagingen in de aangepompte laag geanalyseerd, zoals bij de meest bekende en gebruikte methoden het geval is (WALTON, 1970; KRUSEMAN & DE RIDDER, 1970), maar worden de verlagingen in de aangrenzende lagen eveneens gebruikt om de hydraulische parameters van deze lagen te achterhalen.

De analyse van de verlagingen in aangrenzende lagen wordt enkel in een beperkt aantal werken behandeld. De permanente grondwaterstromingen in een tweelagige halfartesische watervoerende laag, behandeld in KRUSEMAN & DE RIDDER (1970), is een eerste voorbeeld hiervan. In een tweelagige halfartesische watervoerende laag (fig. 1a) wordt de doorlatende laag in twee verdeeld door een halfdoorlatende laag, waarvan de hydraulische weerstand kleiner is dan de hydraulische weerstand van de bovenste, bedekkende halfdoorlatende laag. Twee methoden om de hydraulische parameters van een dergelijke op-eenvolging van lagen te analyseren worden aangehaald. Het zijn de methode van HUISMAN & KEMPERMAN en die van BRUGGEMAN.

Bij de eerste methode wordt enkel gepompt in het bovenste minder doorlatend gedeelte van de watervoerende laag tot wanneer zich een permanente grondwaterstroming heeft ingesteld.

Uit de resulterende verlagingen van een voldoende aantal stijghoogtebuizen in het bovenste en onderste doorlatend gedeelte, kunnen hun transmissiviteiten samen met de hydraulische weerstand van de middelste en van de bovenste halfdoorlatende laag worden berekend.

* L. LEBBE, dr. sc., bevoegd verklaard navorsers bij het N.F.W.O.-Leerstoel voor Toegepaste Geologie (Prof. Dr. W. De Breuck). Rijksuniversiteit Gent, Krijgslaan 281, 9000 GENT.

** K. PEDE, lic. Aard- en Delfstofkunde; bursaal IWONL. Leerstoel voor Toegepaste Geologie (Prof. Dr. W. De Breuck). Rijksuniversiteit Gent, Krijgslaan 281, 9000 GENT.

*** E. VAN HOUTTE, lic. Aard- en Delfstofkunde.

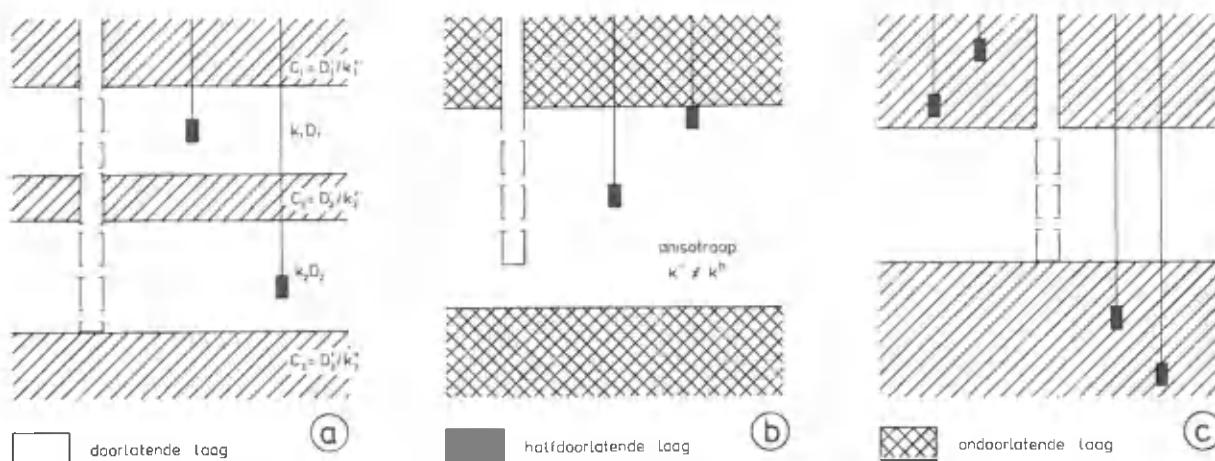


Fig. 1 – Schematische doorsneden van:

- a) tweelagige half-artesische watervoerende laag (KRUSEMAN en DE RIDDER, 1970)
- b) artesische laag met een pompput waarvan de lengte van de filter over een beperkte dikte van de laag voorkomt (WEEKS, 1969)
- c) een gedeelte van een veellagig grondwaterreservoir bestaande uit een afwisseling van doorlatende en halfdoorlatende lagen (NEUMAN en WITHERSPOON, 1972).

Bij de methode van BRUGGEMAN worden dezelfde parameters afgeleid; de analysemethode is echter eenvoudiger. Er moet echter zowel een pumping uitgevoerd worden in het onderste als in het bovenste gedeelte van de halfartesiane laag. Bovendien moeten bij beide pompproeven de verlagingen bekend zijn nadat de evenwichtstoestand zich ingesteld heeft.

Tot de analyse van verlagingen in aangrenzende lagen behoort eveneens de interpretatie van pompproeven die gebeuren in artesische lagen waarbij de filter van de pompput slechts over een beperkte dikte van de doorlatende laag geplaatst is. De verlagingen worden dan gemeten in stijghoogtebuizen of piëzometers die op verschillende diepten van de artesische laag geplaatst zijn (fig. 1b).

WEEKS (1969) verwerkte de anisotropie in de vergelijking van HANTUSH (1961), die de verlaging beschrijft in een artesische watervoerende laag die slechts over een beperkte dikte aangepompt wordt. Hieruit leidde hij een drietal methoden af om de verticale en horizontale doorlatendheden van de artesische laag te bepalen. Deze drie methoden onderscheiden zich naargelang gegevens voorhanden zijn uit een verschillend aantal piëzometers, en naargelang van de duur van de pumping. Uit de afwijking van de gemeten verlagingen tegenover de verlagingen, die zouden optreden in de artesische laag indien de filter van de pompput over de volledige dikte van de artesische laag geplaatst werd, worden de anisotropie en doorlatendheden afgeleid. Daar deze afwijking het grootst is dicht tegen de pompput, zijn er de gegevens van piëzometers op verschillende diepten interessant.

Als laatste voorbeeld kan men de verhoudingsmethode van NEUMAN & WITHERSPOON (1972) aanhalen. Hierbij wordt een systeem beschouwd dat bestaat uit een afwisseling van doorlatende en halfdoorlatende lagen. De pompput wordt geplaatst over de ganse dikte van één van de doorlatende lagen. De verlaging wordt gemeten in de aangepompte doorlatende laag en in de aangrenzende halfdoorlatende laag op verschillende afstanden van het grensvlak tussen de doorlatende en de halfdoorlatende laag (fig. 1c). De verlagingen na een eerder korte periode van pompen komen in aanmerking. Tijdens deze periode mag nog geen betekenisvolle verlaging en stroming plaatsvinden in de niet-aangepompte doorlatende lagen, die grenzen aan de halfdoorlatende lagen, waarin men de verlagingen opneemt. De hydraulische diffusiviteit van de halfdoorlatende laag, dit is de verticale doorlatendheid gedeeld door de specifieke elastische bergingscoëfficiënt, wordt bepaald uit de verhouding van de verlaging in de halfdoorlatende laag en de verlaging in de aangepompte laag op dezelfde relatief korte afstand van de pompput en op hetzelfde tijdstip. De verhoudingsmethode is hier misschien wel een misleidende naam voor deze methode. De hydraulische diffusiviteit van de halfdoorlatende laag wordt veeleer bepaald door de tijdsvertraging waarmee de verlaging optreedt in deze laag.

Uit de hierboven aangehaalde voorbeelden blijkt dat steeds een welbepaalde opeenvolging van doorlatende, halfdoorlatende en ondoorlatende lagen wordt beschouwd. Hierbij wordt gesteund op een beperkt aantal verlagingen onder welbepaalde voorwaarden. Slechts een beperkt aantal parameters worden aldus

bepaald; meestal zijn aanvullende proeven vereist om alle hydraulische parameters te bepalen.

Met het mathematisch model kunnen alle mogelijke opeenvolgingen van doorlatende en halfdoorlatende lagen worden beschouwd. Door de vergelijking van alle gemeten verlagingen in de verschillende lagen op verschillende tijdstippen en afstanden met de berekende, is het mogelijk alle hydraulische parameters af te leiden zonder aanvullende proeven. Hierbij bekomt men één bepaald stel van hydraulische parameters voor de aangepompte en niet-aangepompte lagen waarmee alle waargenomen verlagingen in overeenstemming kunnen worden gebracht.

Bij de interpretatie van pompcurven met de klassieke analytische methode worden verregaande vereenvoudigingen ingevoerd. Hierbij bekomt men meestal een reeks waarden voor één hydraulische parameter. Dit leidt dan meestal tot de verkeerde konklusie dat de watervoerende laag heterogeen is.

De interpretatie van de verlagingen, zowel in de aangepompte doorlatende laag als in de aangrenzende halfdoorlatende en doorlatende lagen, levert niet alleen één enkele waarde voor de horizontale doorlatendheid en specifieke elastische berging van de aangepompte doorlatende laag maar eveneens goed bepaalde waarden voor de verticale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangrenzende lagen.

In hydrogeologische studies waarin de stroming van waters met verschillende dichtheden bestudeerd wordt, is de kennis van de verticale doorlatendheid van alle lagen van groot belang. De interpretatie van waargenomen verlagingen met behulp van het mathematische model wordt dan ook geïllustreerd met twee pompproeven die uitgevoerd zijn in gebieden waar de stroming van waters met verschillende dichtheid bestudeerd worden.

2. WERKWIJZE

Een voorlopige werkwijze werd opgesteld waarbij de verlagingen kunnen geïnterpreteerd worden voor een pompproef die uitgevoerd werd in een doorlatende laag die begrensd is door twee halfdoorlatende lagen. Boven en onder deze laatste ligt een willekeurige opeenvolging van doorlatende en halfdoorlatende lagen. De pompput is voorzien van een volledige filter over de ganse dikte van de doorlatende laag. De piëzometers of stijghoogtebuizen werden geplaatst in de aangepompte doorlatende laag en in alle aangrenzende lagen waarin men een verlaging van de stijghoogte verwacht.

De tijd-verlagingscurven van de aangepompte doorlatende laag worden geïnterpreteerd met de methode van WALTON (in KRUSEMAN & DE RIDDER,

1970). Voor iedere stijghoogtebuis bekomt men een waarde voor de transmissiviteit en de elastische bergingscoëfficiënt van de aangepompte laag en een waarde voor de hydraulische weerstand. Daar men bij de methode van WALTON geen rekening houdt met de berging in de aangrenzende lagen verschillen de afgeleide transmissiviteiten en hydraulische weerstanden sterk naarmate de afstand van de stijghoogtebuis tot de pompput toeneemt. Meestal nemen deze waarden toe met de afstand tot de pompput. NEUMAN & WITHERSPOON (1969b) toonden aan dat deze afwijking toeneemt naarmate de β -lekfactor groter wordt.

Deze β -lekfactor wordt gedefinieerd als:

$$\beta = \frac{r}{4D} \left(\sqrt{\frac{k_u^v S'_{Au}}{k_p^h S'_{Ap}}} + \sqrt{\frac{k_l^v S'_{Al}}{k_p^h S'_{Ap}}} \right)$$

waarbij

- r : de afstand tot de pompput (L^1),
- D : de dikte van de aangepompte laag (L^1),
- k_p^h : de horizontale doorlatendheid van de aangepompte doorlatende laag ($L^1 T^{-1}$)
- k_l^v en k_u^v : de verticale doorlatendheid van respectievelijk de boven- en onderliggende halfdoorlatende laag ($L^1 T^{-1}$)
- S'_{Au} , S'_{Al} , S'_{Ap} : de specifieke elastische berging van respectievelijk de boven- en onderliggende halfdoorlatende laag en van de aangepompte doorlatende laag (L^{-1})

Bij de methode van WALTON veronderstelt men dus dat S'_{Au} en S'_{Al} gelijk zijn aan nul en bijgevolg ook de β -lekfactor. In werkelijkheid kan de berging in de boven- en onderliggende halfdoorlatende lagen niet gelijk gesteld worden aan nul. Daar de β -lekfactor klein is voor geringe afstanden tot de pompput benaderen de waarden bepaald uit de verlagingen dicht tegen de pompput, het best de werkelijke transmissiviteit en de elastische bergingscoëfficiënt van de aangepompte laag. De reciproke waarde van de hydraulische weerstand, bepaald uit de dichtste piëzometer, benadert het best de som van de reciproke waarden van de hydraulische weerstanden van de onder- en bovenliggende halfdoorlatende lagen. Dicht tegen de pompput zijn de r/L -waarden gering. Daar de verschillende r/L -kurven (WALTON-type curven, volgens KRUSEMAN & DE RIDDER (1970), slechts weinig verschillen bij de kleine waarden, is het moeilijk de hydraulische weerstanden nauwkeurig af te leiden uit de tijd-verlagingscurven dicht tegen de pompput.

De waarde van de hydraulische weerstand kan meestal nauwkeuriger worden afgeleid uit de afstand-verlagingscurven na een lange tijd van pompen. De afstand-verlagingscurve, die bereikt wordt na lang

pompen (benadering evenwichtstoestand), kan worden geïnterpreteerd volgens de methode van DE GLEE (in KRUSEMAN & DE RIDDER, 1970). Hierbij bekomt men een waarde voor de transmissiviteit, die vrij goed deze van de aangepompte laag benadert. De reciproke waarde van de hydraulische weerstand is gelijk aan de som van de reciproke waarden van de hydraulische weerstanden van beide aangrenzende lagen. Indien één van de aangrenzende lagen als ondoorlatend kan worden beschouwd, is de gevonden hydraulische weerstand deze van de andere aangrenzende laag. Indien de beide lagen een hydraulische weerstand hebben die niet een aantal orden van grootte verschillen, is het moeilijk de hydraulische weerstand van de lagen afzonderlijk te bepalen, indien men uitsluitend met de verlagingen in de aangepompte laag rekening houdt.

Kent men de verlaging in de aangrenzende halfdoorlatende laag, dan kan men de verhoudingsmethode van NEUMAN & WITHERSPOON (1972) aanwenden. Hierbij bepaalt men de hydraulische weerstand van het gedeelte van de halfdoorlatende laag, dat gelegen is tussen de onderste opening van de piëzometer of de gemiddelde hoogte van de filter van de stijghoogtebuis en het contactvlak tussen de doorlatende en de halfdoorlatende laag.

De specifieke elastische berging moet echter bepaald worden door samendrukkingsproeven in het laboratorium of door extensometers in het boorgat, wil men uit de afgeleide hydraulische diffusiviteit de verticale doorlatendheid van de halfdoorlatende laag terugvinden. De bepaling van de specifieke elastische berging van de halfdoorlatende laag uit de gegevens van de verlaging blijft dus vooralsnog een probleem.

Indien de verticale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangrenzende halfdoorlatende lagen voldoende groot is, kan men met de methode van HANTUSH (1960) de β -waarde bepalen. Dit gebeurt door de vergelijking van het eerste gedeelte van de tijd-verlagingscurven met de β -curven van HANTUSH (1960).

Beschikt men in dit geval over waarnemingen in de aangrenzende halfdoorlatende laag en kan de andere aangrenzende laag als ondoorlatend worden beschouwd, dan is het mogelijk door de combinatie van de methode van HANTUSH (1960) en de methode van NEUMAN & WITHERSPOON (1972) zowel de specifieke elastische berging als de verticale doorlatendheid van de aangrenzende halfdoorlatende laag uitsluitend uit de analyse van de verlagingen te bepalen.

Na schatting van de hydraulische parameters met de bestaande methoden, kan één stel waarden voor de specifieke elastische berging, de horizontale en de verticale doorlatendheid van iedere laag in het mathematisch model gebracht worden. De berekende en de

waargenomen verlagingen in de verschillende lagen worden zowel in tijd-verlagingscurven als in afstand-verlagingscurven bilogarithmisch uitgezet (fig 4 en fig 7).

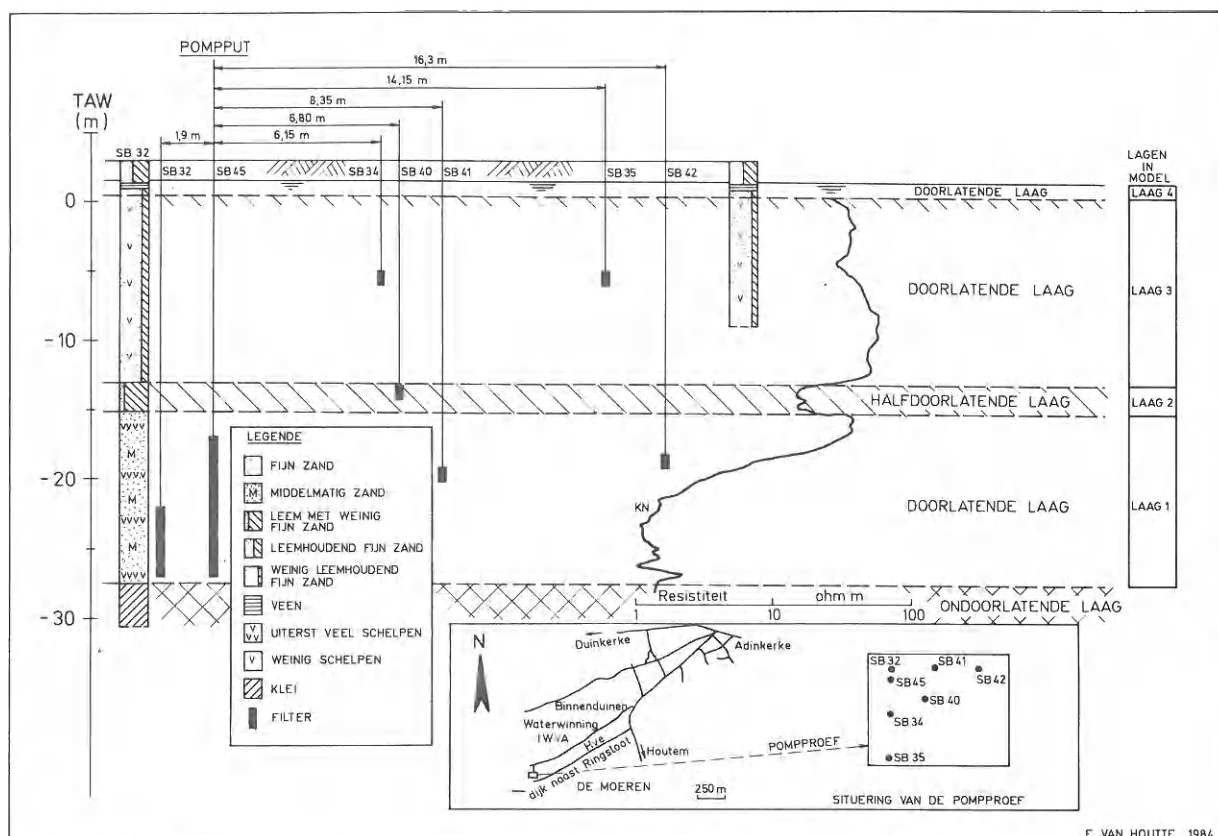
Uit de afwijkingen tussen de gemeten en de berekende verlagingen kan men afleiden hoe de ingebrachte hydraulische parameters moeten worden aangepast. Hierbij dient men met de volgende punten rekening te houden. Het begin van de tijd-verlagingscurve van de aangepompte laag is vooral functie van de elastische bergingscoëfficiënt en de transmissiviteit van deze laag; het einde is functie van de hydraulische weerstand van de aangrenzende lagen en de transmissiviteit van de aangepompte laag. De vorm van de afstand-verlagingscurve, na lang pompen, van de aangepompte laag is dus functie van de transmissiviteit van de aangepompte laag en de hydraulische weerstand van de aangrenzende halfdoorlatende laag. Het begin van de tijd-verlagingscurve in de aangrenzende halfdoorlatende laag is vooral afhankelijk van de elastische bergingscoëfficiënt van de laag en de hydraulische weerstand van de halfdoorlatende laag boven en onder de plaats van de piëzometer. Het einde van de tijd-verlagingscurve of de vorm van de afstand-verlagingscurve op het einde van de pomp-proef, waarbij een evenwichtstoestand benaderd wordt, is afhankelijk van de hydraulische weerstand van de halfdoorlatende laag, onder en boven de plaats van de piëzometer en van de horizontale doorlatendheid van deze laag. In de daaropvolgende doorlatende en halfdoorlatende lagen is de verlaging steeds meer afhankelijk van alle hydraulische parameters van het grondwaterreservoir. Bijgevolg zal het steeds moeilijker worden uit de opgemeten, meestal geringe, verlagingen in deze lagen de juiste hydraulische parameters ervan af te leiden. Daarom is het aan te raden in een grondwaterreservoir dat een complex vormt van verschillende doorlatende en halfdoorlatende lagen, een net van piëzometers aan te brengen in alle lagen en pomp-proeven uit te voeren in de verschillende doorlatende lagen afzonderlijk.

Door middel van een sensitiviteitsanalyse kan men een stel van interpretatieregels opstellen die ertoe leiden dat een beperkt aantal simulaties volstaan om een goede overeenkomst te bereiken tussen de berekende en de waargenomen verlagingen.

3. POMPPROEF IN DE BINNENDUINEN VAN ADINKERKE

3.1. Situering en hydrogeologische gesteldheid

De pompput en de stijghoogtebuizen van deze pomp-proef bevinden zich op de zuidelijke rand van de Binnenduinen ('Oude duinen van Adinkerke-Ghyvelde') tegen de Frans-Belgische Moeren aan. Op die plaats is de verticale komponent van de grondwaterstroming belangrijk: onder de Binnenduinen



E. VAN HOUTTE 1984

Fig. 2 – Litostratigrafische doorsnede, opgesteld met behulp van boorbeschrijvingen en van gegevens van de KN-opstelling, samen met de doorlatende en halfdoorlatende lagen in het mathematisch model en de plaats van de filters van de stijghoogtebuizen en de pompput (pompproef Binnenduinen Adinkerke).

Radius of well screen, R , in m	0.1
Discharge of pumped well, Q , in m ³ /day	880.
Initial time, T_1 , in min	0.1
Logarithmic increase of time and of radius of rings, $\log R$	0.1
Latest calculated time, T_2 , in min	1650.
Number of layers, n	4
Number of rings, m	45
In which layer 1: the wellscreen situated, w	1
Thickness of the successive layers, in m numbered from lower to upper	
$D(1)$	12.3
$D(2)$	2.2
$D(3)$	13.5
$D(4)$	1.8
Hydraulic conductivity, $k(1)$, in m/day	125.
Hydraulic conductivity, $k(2)$, in m/day	0.2
Hydraulic conductivity, $k(3)$, in m/day	9.0
Hydraulic conductivity, $k(4)$, in m/day	9.0
Hydraulic resistance, $c(1)$, in day	450.
Hydraulic resistance, $c(2)$, in day	50.
Hydraulic resistance, $c(3)$, in day	180.
Specific elastic storage, $S^*A(1)$, in m-1	4.0E-5
Specific elastic storage, $S^*A(2)$, in m-1	8.0E-5
Specific elastic storage, $S^*A(3)$, in m-1	1.0E-4
Specific elastic storage, $S^*A(4)$, in m-1	1.0E-4
Storage coefficient at the water table, S_0	0.25

Fig. 3 – De ingebrachte hydraulische parameters waarvan de berekende verlagingen de waargenomen verlaging van de pompproef in de Binnenduinen te Adinkerke sterk benaderen.

stroomt zoet water tengevolge van infiltratie neerwaarts; onder de zuidelijke rand van De Moeren stroomt zout water opwaarts tengevolge van het lage peil in de afwateringsgrachten nabij de Binnenduinen (LEBBE et al., 1983). Om deze stroming nauwkeurig te omschrijven moet naast de horizontale doorlatendheid, de verticale doorlatendheid goed worden bepaald.

Een litostratigrafische doorsnede werd getekend met behulp van de boorbeschrijvingen en aan de hand van de resultaten van een boorgatmeting uitgevoerd met een KN-opstelling (fig. 2). De Ieperiaanklei (Formatie van Vlaanderen) vormt een **ondooralatende basis**. Deze klei begint op het peil -27,5* en is iets meer dan honderd meter dik. Tussen -27,5 en -15,2 komt een **doorlatende laag** (laag 1) voor die bestaat uit middelmatige tot grove zanden met uiterst veel schelpen. Deze laag heeft een beperkte laterale uitbreiding. Ze vormt een bank, die gelegen is onder de grens van de binnenduinen van Adinkerke en De Moeren. De uitbreiding naar het noorden en het zuiden is beperkt. Bij gebrek aan gegevens is het niet mogelijk de omvang van deze schelpenbank nauwkeurig vast te stellen. Op deze sterk doorlatende laag ligt een **halfdoorlatende laag** van 2,2 m dikte, gevormd door een zandige-leemlaag (laag 2). Daarop volgen **twee doorlatende lagen** die bestaan uit goed gesorteerd middelmatig tot fijn zand en die van elkaar gescheiden zijn door een horizont van sterk humeus tot venig zand dat een betekenisvolle hydraulische weerstand heeft. De onderste (laag 3) ligt tussen de peilen -13 en +0,5, de bovenste (laag 4) tussen de peilen +0,5 en +1,5.

3.2. Uitvoering van de pompproef

De opstelling van de pompproef is in fig. 2 voorgesteld, samen met de litostratigrafische opbouw en de indeling in doorlatende en halfdoorlatende lagen. De pompput werd voorzien van een filterelement in laag 1. De lengte van het filterelement bedraagt 10 m, de diameter 110 mm. Zes stijghoogtebuizen met een diameter van 40 mm en een filterelement van één meter lengte werden geplaatst. Drie stijghoogtebuizen werden in de aangepompte laag op een lijn geplaatst op respectievelijk 1,9, 8,4 en 16,3 m van de pompput. Eén stijghoogtebuis werd geplaatst midden in de halfdoorlatende laag op 6,8 m van de pompput. In de onderste van de twee doorlatende lagen werden rond het peil -5 twee stijghoogtebuizen geplaatst op 6,1 m en 14,1 m van de pompput.

De aangepompte laag heeft een grote transmissiviteit en is gevuld met zout water. Om een betekenisvolle verlaging te verkrijgen moest met een hoog debiet

zout water aan de pompput worden onttrokken ($Q = 880 \text{ m}^3/\text{dag}$). Op 14 december 1983 werd de pompproef aangevat. Gedurende 1 dag werd gepompt.

3.3. Interpretatie

3.3.1. Klassieke analytische methoden

Het eerste gedeelte van de tijd-verlagingscurve van de aangepompte laag valt volledig samen met een THEIS-curve. Na dertig minuten pompen, neemt de verlaging sterk toe. Dit kan toegeschreven worden aan een laterale afname van de transmissiviteit van de aangepompte laag. Deze verlaging kan beschouwd worden als het resultaat van de pumping op de pompput zelf en van een schijnbare pumping op een fiktieve put. Deze fiktieve put is een spiegeling van de werkelijke pompput ten opzichte van het minder doorlatend vertikaal grensvlak. Het schijnbaar opgepompte debiet is een fraktie van het werkelijke opgepompte debiet dat gegeven wordt door de verhouding $(kD_1 - kD_2)/(kD_1 + kD_2)$. Hierbij zijn kD_1 en kD_2 de transmissiviteit vóór en achter het grensvlak ($kD_1 > kD_2$).

Deze benadering geldt eveneens voor een meer doorlatend vertikaal grensvlak ($kD_1 < kD_2$); in dat geval heeft de factor $(kD_1 - kD_2)/(kD_1 + kD_2)$ een negatieve waarde. Dit komt dan overeen met een fiktieve injectieput die het spiegelbeeld is van de werkelijke pompput tegenover de verticale meer doorlatende grens. Het geïnjecteerde debiet is het opgepompte debiet vermenigvuldigd met de absolute waarde van $(kD_1 - kD_2)/(kD_1 + kD_2)$. Deze theoretische benadering is afgeleid naar analogie met het elektrische stroom- en potentiaal-verloop in een continu medium (JAKOSKY, 1957). In de meeste handboeken van de hydrogeologie worden enkel de bijzondere gevallen behandeld van een ondoorlatend vertikaal grensvlak ($kD_2 = 0$, $(kD_1 - kD_2)/(kD_1 + kD_2) = 1$) of van een vast stijghoogtegrensvlak ($kD_2 = \infty$, $(kD_1 - kD_2)/(kD_1 + kD_2) = -1$) behandeld (TODD, 1980; BEAR, 1979; DOMENICO, 1972). Komt meer dan één grensvlak voor dan moet niet alleen de werkelijke pompput gespiegeld worden tegenover alle grensvlakken, maar moeten deze primaire fiktieve putten eveneens gespiegeld worden tegenover alle grensvlakken, zodat we een secundaire reeks van fiktieve putten verkrijgen. Dit moet zoveel maal herhaald worden totdat de hogere reeks van fiktieve putten geen invloed meer heeft op de plaats waar men de verlaging wenst te kennen. Tenslotte kan een geleidelijke overgang van een meer naar een minder doorlatende laag beschouwd worden als een reeks van achter elkaar gelegen minder doorlatende grensvlakken. Uit het bovenstaande blijkt dat de verlaging opgeteuten in een stijghoogtebuis nadat de depressietrechter de verschillende grenzen bereikt een functie is van de ligging en van het transmissiviteitscontrast van deze

* Alle peilen worden uitgedrukt in meters ten opzichte van het nulpeil van de Tweede Algemene Waterpassing (m TAW) van het Nationaal Geografisch Instituut.

TABEL I

Hydraulische parameters bepaald volgens de methode van THEIS uit het eerste gedeelte van de tijd-verlagingscurven opgenomen in de aangepompte laag (pompproef Binnenduinen Adinkerke).

Stijghoogtebuis nummer	Afstand (m)	Transmissiviteit (m^2/dag)	Elastische bergingscoëfficiënt (dimensieloos)
193SB32	1,9	1450	$8,3 \cdot 10^{-4}$
193SB41	8,35	1680	$4,2 \cdot 10^{-4}$
193SB42	16,30	1540	$4,8 \cdot 10^{-4}$

grenzen. Bij laterale faciënwisselingen valt het dan ook moeilijk deze verlaging verder te analyseren. In dit geval kan enkel het eerste gedeelte van de tijd-verlagingscurve geanalyseerd worden omdat het niet beïnvloed wordt door deze grenzen en het zich gedraagt alsof de watervoerende laag een oneindig homogene uitbreiding heeft. Het eerste gedeelte van de tijd-verlagingscurve kan volgens de methode van THEIS geïnterpreteerd worden. De bekomen hydraulische parameters worden in tabel I weergegeven. De waarden voor de transmissiviteit vertonen geen sterke variaties; de variaties van de elastische bergingscoëfficiënt zijn groter. De afgeleide waarden voor de hydraulische doorlatendheid variëren tussen 118 en 136 m/d met een gemiddelde van 126,5 m/d.

De lekfactor wordt bepaald uit het laatste gedeelte van de tijd-verlagingscurven van de aangepompte laag. Dit gedeelte van de curve is eveneens beïnvloed door de laterale faciënwisseling van de laag. Daar beide invloeden moeilijk te scheiden zijn, kon de lekfactor niet worden bepaald. Uit de verlaging gemeten in de aangepompte laag konden dus geen nauwkeurige gegevens afgeleid worden over de hydraulische weerstand of over de verticale hydraulische doorlatendheid van de bedekkende halfdoorlatende laag. Hiervoor zijn de verlagingen gemeten in de bedekkende halfdoorlatende laag van groot belang. NEUMAN & WITHERSPOON (1972) ontwikkelden een analytische methode om uit deze laatste de verticale doorlatendheid van de halfdoorlatende laag te bepalen. Bij de toepassing van de methode moet aan volgende voorwaarden voldaan worden: de stroming of de verlaging in de doorlatende laag boven de halfdoorlatende moet nul of zeer klein zijn en de horizontale doorlatendheid in de halfdoorlatende laag is zo klein zodat ze gelijk kon gesteld worden aan nul. Deze methode heeft echter één zwak punt: de waarde van de specifieke elastische berging van de halfdoorlatende laag moet ingevoerd worden. Deze moet afgeleid worden uit aanvullende proeven, ofwel door het plaatsen van extensometers in het boorgat ofwel door samendrukingsproeven op ongeroerde monsters. Indien men geen van beide proeven kan uitvoeren dient de waarde ingeschat te worden met behulp van literatuurgegevens.

Door toepassing van deze methode op de verlagingen, opgemeten in het begin van de pompproef, bekomen we een hydraulische diffusiviteit van 28 en 32 m^2/dag . Neemt men een specifieke elastische berging aan van $1 \cdot 10^{-4} \text{m}^{-1}$ dan bekomt men een verticale doorlatendheid van $2,8 \cdot 10^{-2}$ en $3,2 \cdot 10^{-2} \text{m/dag}$ voor de bedekkende halfdoorlatende laag.

Een pompproef uitgevoerd op gelijkaardige goed gesorteerde middelmatige tot fijne zanden (laag 3 en 4) op een tweetal kilometers ten noorden van het proefgebied, geven een waarde van 9 m/dag voor de horizontale hydraulische doorlatendheid.

3.3.2. *Matematisch model*

De hydraulische parameters, afgeleid volgens de klassieke analytische methoden, werden in het mathematische model gebracht. De horizontale doorlatendheid en de elastische bergingscoëfficiënt werden afgeleid uit de verlagingcurve van deze laag, volgens de methode van THEIS. De hydraulische diffusiviteit van de aangrenzende halfdoorlatende laag werd geraamd uit de vergelijking van de verlaging in de aangepompte doorlatende en in de aangrenzende halfdoorlatende laag met de methode van NEUMAN & WITHERSPOON (1972). De andere parameters zoals de verticale en horizontale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangrenzende lagen moesten echter worden ingeschat. Dit gebeurde aan de hand van de litologische doorsnede en van de kennis van de hydraulische parameters van gelijkaardige afzettingen uit de omgeving, die reeds door voorgaande proeven bepaald werden.

Met deze hydraulische parameters werden de verlagingen berekend. Deze werden vergeleken met de waargenomen verlagingen. Uit de afwijkingen tussen de berekende en de waargenomen verlaging werden de ingevoerde parameters gewijzigd. Dit gebeurt vooralsnog proefondervindelijk. Zo werden de berekende verlagingen van de aangepompte laag met de waargenomen verlagingen voor de dertigste minuut vergeleken. Zoals in 3.3.1. uiteengezet komen deze waargenomen verlagingen overeen met de verlagingen

gen, die in deze laag zouden plaatsvinden, indien deze laag een grote laterale uitbreiding zou hebben. Bij de berekeningen met het mathematisch model wordt dit eveneens verondersteld. De waargenomen verlagingen in de aangepompte laag, na de dertigste minuut, worden beïnvloed door de laterale faciënwisseling van deze laag. Daar het mathematisch model opgesteld is als een axiaal-symmetrisch tweedimensioneel model is het moeilijk willekeurig faciënwisselingen van een bepaalde laag hierin te verwerken. Om deze reden werd dan ook geen rekening gehouden met de afwijking tussen de waargenomen en de berekende verlaging van de aangepompte laag na de dertigste minuut van pompen.

Bij de aanpassing van de verschillende hydraulische parameters stelde men vast dat de plaats en de vorm van de berekende tijd- en afstand-verlagingscurve van de aangepompte laag (1) op zeer verschillende wijze afhankelijk zijn van deze parameters. De horizontale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangepompte laag (laag 1) zijn de meest gevoelige parameters. Verder is de verlaging van de aangepompte laag (1) in afnemende mate ook nog gevoelig aan de hydraulische weerstand tussen laag 1 en laag 2, de specifieke elastische berging van de aangrenzende halfdoorlatende laag (2) en de hydraulische weerstand tussen laag 2 en laag 3. De andere parameters beïnvloeden slechts in geringe mate de verlaging in de aangepompte laag. Het zijn dan ook deze parameters die afhankelijk van hun gevoeligheid met een verschillende mate van nauwkeurigheid kunnen bepaald worden.

De plaats en de vorm van de bereikte tijd- en afstand-verlagingscurven van de aangrenzende halfdoorlatende laag (2) worden nu niet alleen sterk bepaald door de horizontale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangepompte laag (1) maar tevens en in een meer gelijke mate door de hydraulische weerstand tussen laag 1 en laag 2 en tussen laag 2 en laag 3 en door de specifieke elastische berging van laag 2. Uit de verlaging in laag 2 kan men dus met een grotere mate van nauwkeurigheid deze laatste parameters bepalen dan uit de verlaging van de aangepompte laag.

De waargenomen verlaging in laag 3 is slechts van de orde van enkele centimeters. Het is dan ook duidelijk dat de waarneming van dergelijke geringe verlagingen door middel van een elektrische peilmeter minder nauwkeurig kan geschieden dan van de grotere verlagingen in laag 1 en laag 2. Niettegenstaande deze mindere nauwkeurigheid ziet men dat de verlaging in laag 3 op 6,3 en 14,3 m van de pompput ongeveer gelijk is. De berekende verlagingen van deze doorlatende laag 3 is eveneens weinig afhankelijk van de afstand tot de pompput, althans voor een afstand kleiner dan 100 m (zie fig. 4). Naast de reeds vernoemde parameters is de verlaging in deze laag afhankelijk

van de hydraulische parameters van deze laag. Aangezien deze verlaging echter gering is en reeds afhankelijk is van een groot aantal parameters in een gelijke mate, is het moeilijk uit de waargenomen verlaging in laag 3 de hydraulische parameters van laag 3 nauwkeurig te bepalen. Om de hydraulische parameters van laag 3 nauwkeurig te bepalen kan men beter een pompproef uitvoeren waarbij de doorlatende laag 3 wordt aangepompt terwijl de verlaging in deze laag en in de aangrenzende lagen wordt gevolgd.

De verlaging in laag 4 is zo klein (fig. 4) dat men ze niet kan waarnemen; deze is trouwens van alle ingevoerde parameters in min of meer gelijke mate afhankelijk. Daarom kan men uit deze pompproef de parameters van laag 4 niet bepalen. Enkel geschatte waarden voor deze parameters worden in het model gebracht, zodanig dat het mogelijk wordt de berekening uit te voeren.

Bij de ingebrachte hydraulische parameters (fig. 3) stemmen de berekende verlagingen in grote mate overeen met de waargenomen (fig. 4). Het is duidelijk dat meer hydraulische parameters kunnen worden afgeleid dan met de klassieke interpretatiemethode tot nu toe mogelijk was. Hun nauwkeurigheid is echter niet gelijk.

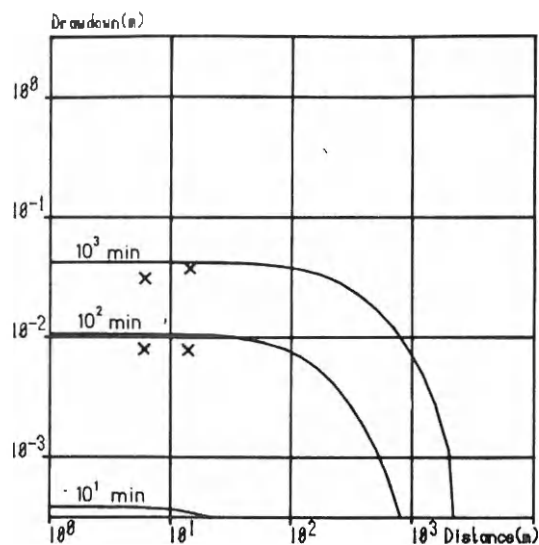
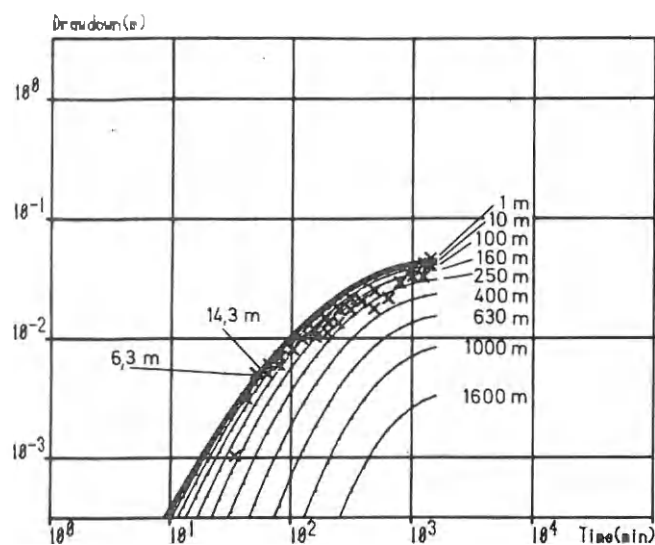
4. POMPPROEF IN DE ZWARTE-SLUIS-POLDER TE ASSENEDE

4.1. Situering en hydrogeologische gesteldheid

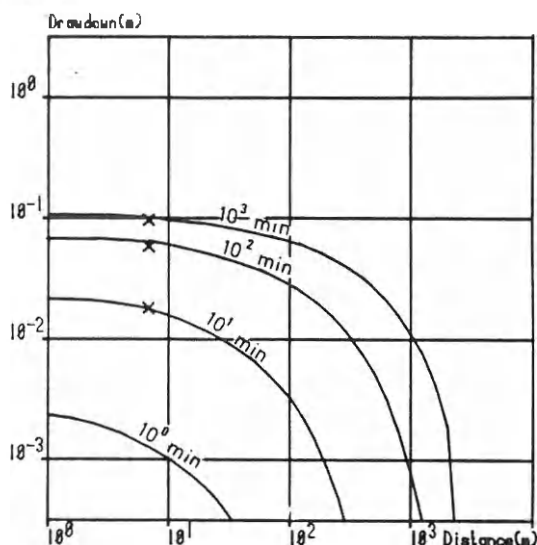
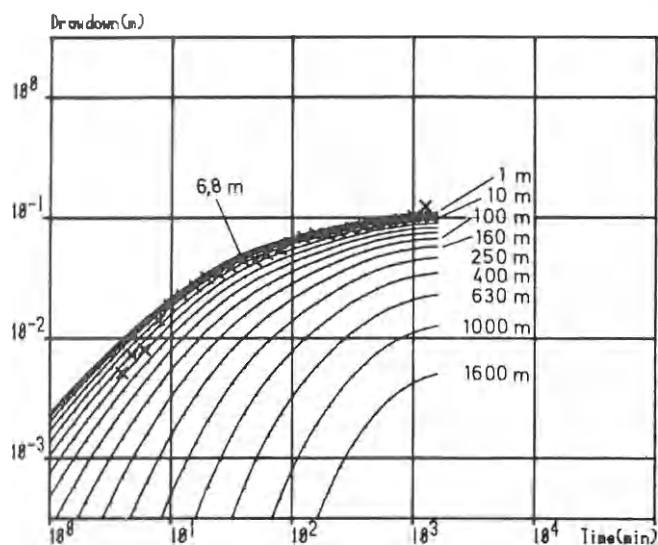
De pompproef werd uitgevoerd in het sterk verzilte poldergebied van de Zwarte-Sluispolder. Matig brak grondwater ($\pm 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$) komt er voor vanaf een diepte van ongeveer 3 m onder het maaiveld. De polderklei wordt geassocieerd met de Duinkerke-3B transgressie (GOTTSCHALK, 1955).

Aan de hand van de boorbeschrijvingen afkomstig van de spoelboringen en de bijhorende boorgatmetingen, voornamelijk steunend op de natuurlijke gamma-metingen, werd een litostratigrafische doorsnede opgesteld (fig. 5). Het verloop van de natuurlijke gamma van de diepste boring (P49) werd in de doorsnede opgenomen. Het onderscheid tussen de verschillende litostratigrafische eenheden steunt dan ook voornamelijk op deze natuurlijke-gammameting.

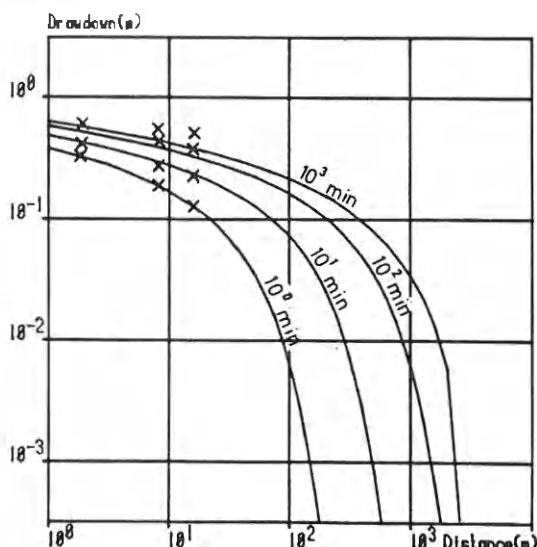
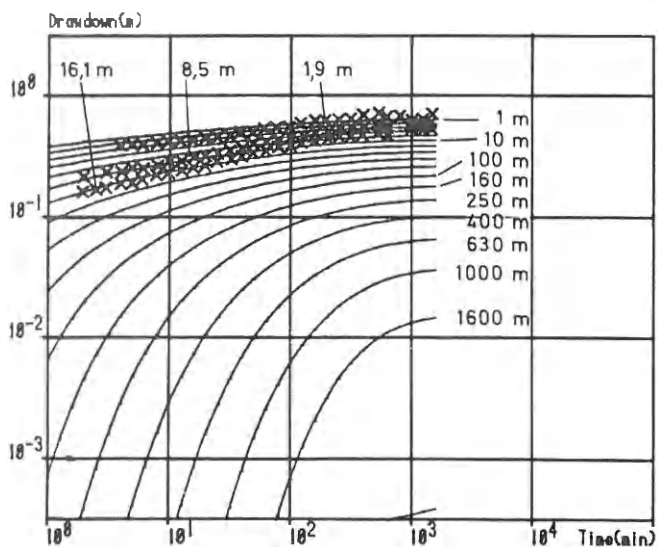
De **ondoortalende basis** wordt gevormd door een kalkloze, glimmerhoudende groene klei met talrijke pyrietkonkreties. De top van de klei wordt aangetroffen op het peil -36,25. Daarboven komt een **doorlatende laag** (laag 1) voor bestaande uit een donker-groen fijn, glaukoniet- en glimmerhoudend, weinig kleihoudend kalkloos zand met af en toe stukken *Ostrea*. Naar de basis toe, vanaf het peil -31 komen meerdere stukken *Ostrea* en zeer veel nummulieten



LAYER 3



LAYER 2



LAYER 1

Fig. 4 – De waargenomen (kruisjes) en berekende (curven) verlagingen bij de pompproef in de Binnenduinen van Adinkerke (vervolg op blz 141).

voor. De top van deze laag bevindt zich op het peil -18,55. De totale dikte bedraagt 17,7 m.

Daarboven ligt een **halfdoorlatende laag** (laag 2) bestaande uit een glaukoniet- en glimmerhoudende, kalkloze, sterk zandhoudende klei, tot kleiig zand waarvan de top zich bevindt op het peil -9,55. De dikte bedraagt 9 m. Hierop volgt een **doorlatende laag** (laag 3) bestaande uit een bleekgrijs, middelmatig zand met fijn schelpgruis; naar de basis toe komen verschillende schelpfragmenten en nummulieten voor. Aan de basis treft men enkele klei- en veenbrokken en enkele silexen aan. De top van de laag bevindt zich op het peil -2,55. De dikte bedraagt 7 m. Hierop rust een **halfdoorlatende laag** (laag 4) bestaande uit een afwisseling van grijze leem, bruin-grijze tot bruine humeuze tot venige leem met tamelijk fijn, grijs zand. Uit gestoken kernen blijkt dat deze laag sterk gekryoturbeerd is. De top bevindt zich op het peil + 1,45. De dikte bedraagt 4 m. Daarboven ligt een **bedekkende halfdoorlatende laag** (laag 5), aan de basis bestaande uit een grijs, fijn, soms humushoudend zand en aan de top bestaande uit een bruin-grijze, kalkhoudende, leemhoudende klei. De dikte van de klei bedraagt ongeveer 0,50 m. De totale dikte van de bedekkende halfdoorlatende laag bedraagt 1,50 m.

4.2. Uitvoering van de pompproef

Het filtergedeelte van de pompput met diameter van 225 mm werd geplaatst over de totale lengte van de tweede doorlatende laag (7m).

In de verschillende lagen en op verschillende afstanden van de pompput werden piëzometers met diameter van 63 mm en erop aansluitende filter van 1 m geplaatst. In de aangepompte laag (laag 3) werden vijf stijghoogtebuizen geplaatst; in laag 1 en 2 werd één stijghoogtebuis geplaatst. De stijghoogtebuizen en de pompput bevinden zich alle langs dezelfde profiellijn zoals aangeduid in fig. 5.

Op 7 november 1983 werd de pompput (P51) bemaalen gedurende een periode van 4320 minuten (3 da-

gen). Het debiet dat gedurende het hele verloop van de pompproef aan de hand van een debietmeter regelmatig werd gecontroleerd, was konstant en bedroeg 264 m³/dag.

Bij de aanvang van de pompproef werd in de piëzometer in laag 1 (P49F4) gedurende de eerste 20 minuten een stijging van 4 cm waargenomen; na 65 minuten bevond het water zich weer op het oorspronkelijke rustpeil, om dan verder te dalen. Deze aanvallende stijging is het NOORDBERGUM-effekt zoals verklaard door VERRUIJT (1969).

4.3. Interpretatie van de pompproef

4.3.1. Klassieke analytische methoden

Met de methode van WALTON werden de transmissiviteit en de elastische bergingscoëfficiënt van de aangepompte laag bepaald en een hydraulische weerstand waarvan de reciproke waarde gelijk is aan de som van de reciproke waarden van de hydraulische weerstanden van de aangrenzende halfdoorlatende lagen (tab. II). Met de afstand tot de pompput nemen de berekende waarden van de transmissiviteit en van de hydraulische weerstand toe. Zoals vermeld in de inleiding is dit niet te wijten aan de heterogeniteit van de aangepompte laag, maar is dit een gevolg van het ontkennen van de bergingsvermindering in de aangrenzende lagen met de methode van WALTON. De berekende waarden van de elastische bergingscoëfficiënt zijn minder afhankelijk van de afstand tot de pompput.

De methode van DE GLEE werd toegepast op de waargenomen verlaging op het einde van de pompproef. De transmissiviteit bedraagt 88 m²/dag, de hydraulische weerstand 352 dagen. Alhoewel kleiner stemmen de waarden het best overeen met deze bepaald uit de tijd-verlagingscurven van de dichtste piëzometer. Dit is vooral het geval voor de hydraulische weerstand.

Aangezien de verlagingen in de aangrenzende doorlatende lagen te vlug optreden (fig. 7) is niet aan de voorwaarden voldaan om de methode van NEUMAN & WITHERSPOON (1972) toe te passen.

TABEL II

Hydraulische parameters bepaald volgens de methode van WALTON uit de tijd-verlagingscurven in de stijghoogtebuizen in de aangepompte laag.

Stijghoogtebuis nummer	Afstand (m)	Transmissiviteit (m ² /dag)	Elastische bergingscoëfficiënt (dimensieloos)	Hydraulische weerstand (dag)
P49	6,25	105	$3 \cdot 10^{-4}$	595
P50	12,5	105	$3,5 \cdot 10^{-4}$	595
P24	25	117	$4,13 \cdot 10^{-4}$	950
P23	50	225	$5,3 \cdot 10^{-4}$	1110
P15	194	422	$9,3 \cdot 10^{-4}$	3960

Radius of well screen, R , in m	0.125
Discharge of pumped well, Q , in m ³ /day	265.0
Initial time, T_1 , in min	0.1
Logarithmic increase of time and of radius of rings, $\log A$	4320.
Latest calculated time, T_2 , in min	5
Number of layers, n	41
In which layer is the wellscreen situated, u	3
Thickness of the successive layers, in m	
$D(1)$ -----	17.7
$D(2)$ -----	9.0
$D(3)$ -----	7.0
$D(4)$ -----	4.0
$D(5)$ -----	0.5
Hydraulic conductivity, $k(i)$, in m/day	
$k(1)$ -----	4.0
$k(2)$ -----	0.2
$k(3)$ -----	13.5
$k(4)$ -----	0.02
$k(5)$ -----	2.5
Hydraulic resistance, $c(i)$, in day	
$c(1)$ -----	720.
$c(2)$ -----	400.
$c(3)$ -----	45.0
$c(4)$ -----	340.
Specific elastic storage, $S_A(i)$, in m ⁻¹	
$S_A(1)$ -----	$2.5E-5$
$S_A(2)$ -----	$3.2E-7$
$S_A(3)$ -----	$4.8E-5$
$S_A(4)$ -----	$4.0E-5$
$S_A(5)$ -----	$2.5E-4$
Storage coefficient at the water table, S_0	0.125

Fig. 6 – De ingebrachte hydraulische parameters waarvan de berekende verlagingen de waargenomen verlaging van de pompproef in de Zwarte-Sluispolder te Assenede sterk benaderen.

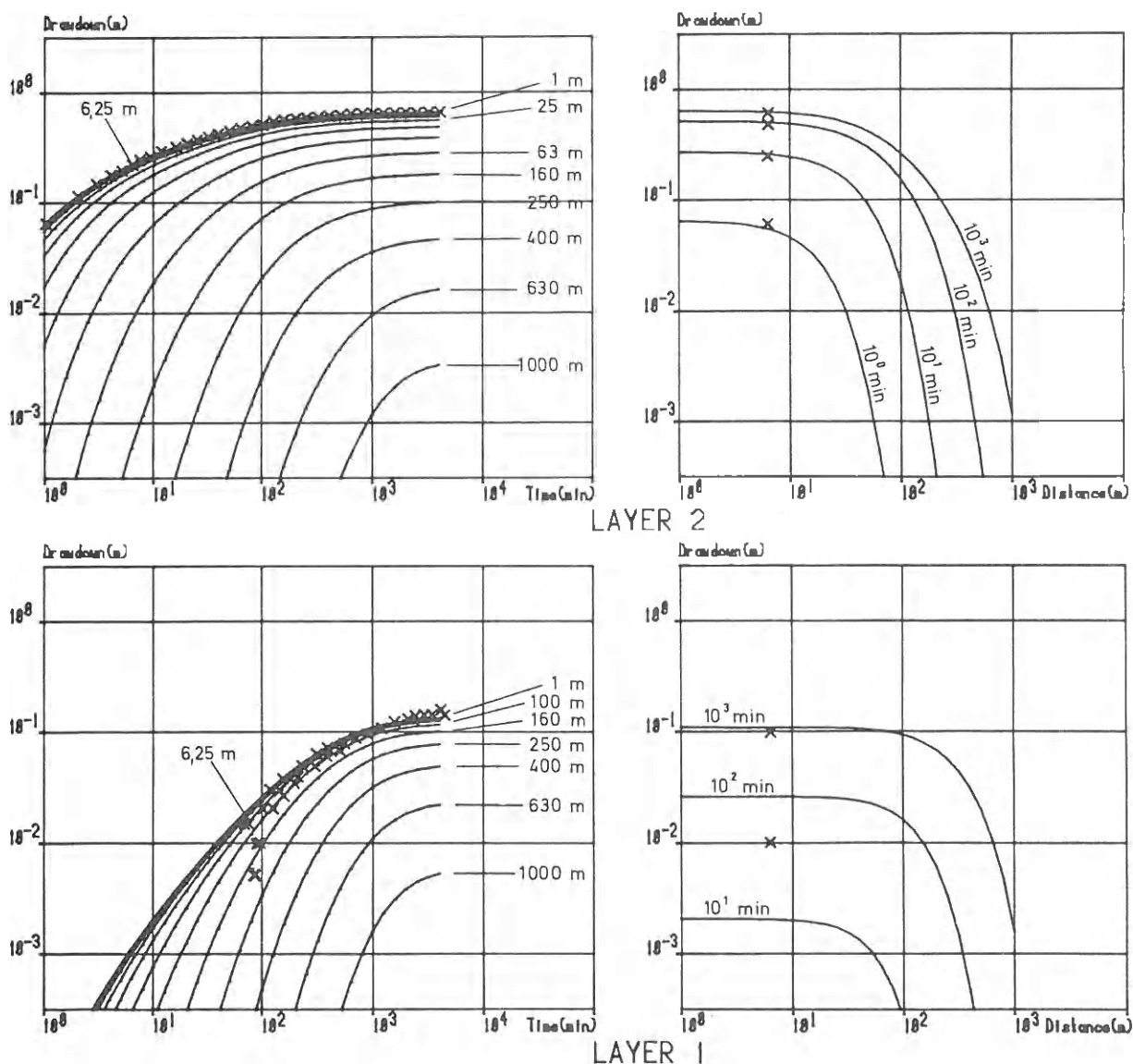
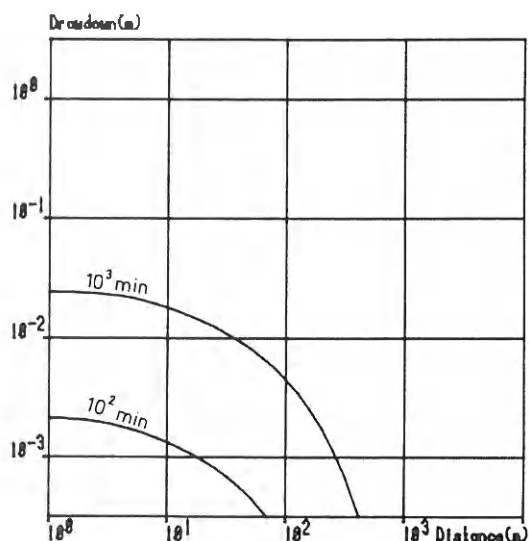
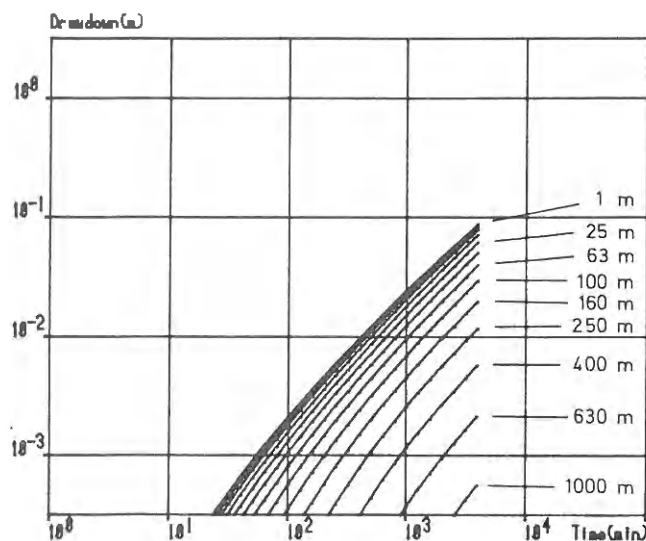
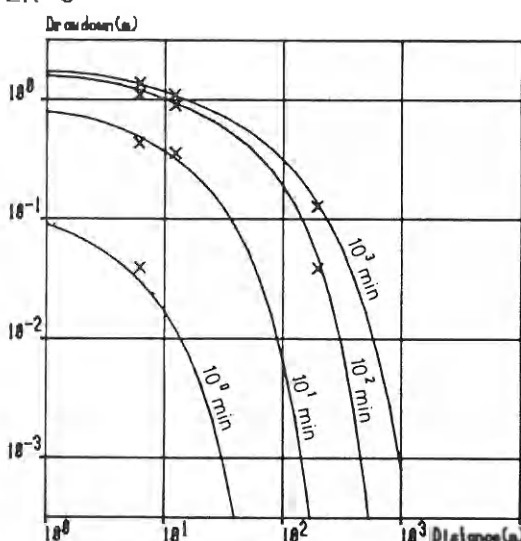
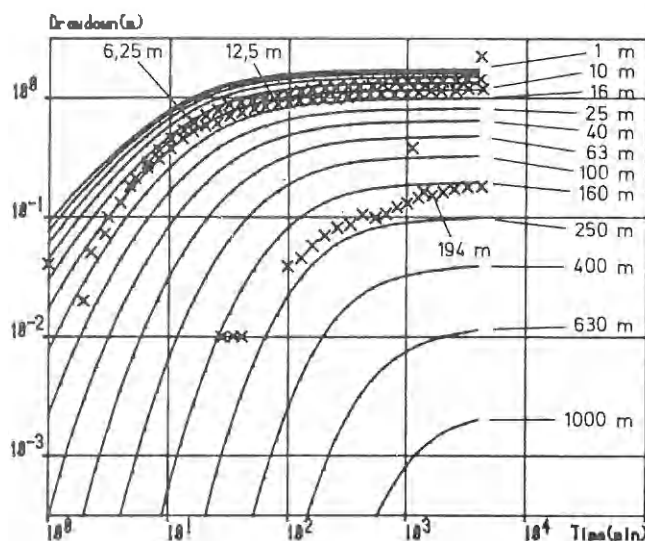


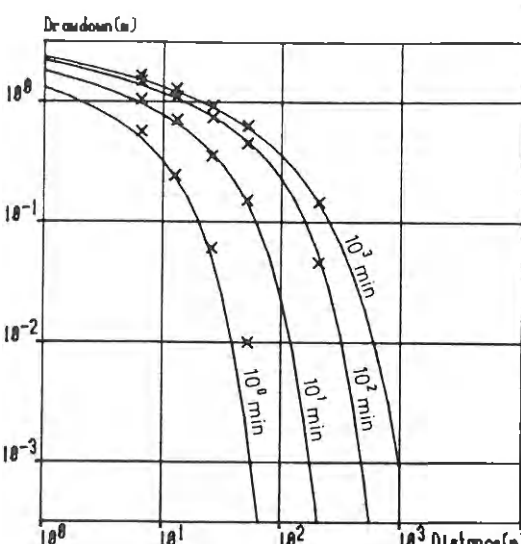
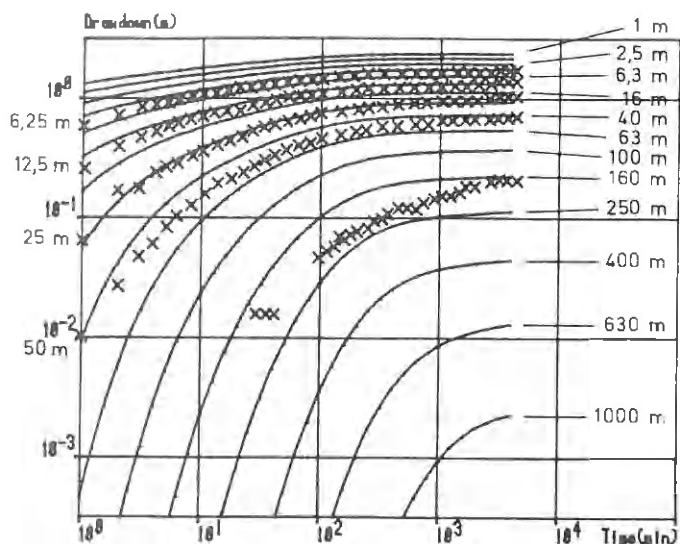
Fig. 7. – De waargenomen (kruisjes) en berekende (curven) verlagingen bij de pompproef in de Zwarte-Sluispolder te Assenede (vervolg op blz 144).



LAYER 5



LAYER 4



LAYER 3

Fig. 7 – Vervolg – De waargenomen (kruisjes) en berekende (curven) verlagingen bij de pompproef in de Zwarte-Sluispolder te Assenede.

4.3.2. *Matematisch model*

Aan de hand van de in paragraaf 4.3.1. berekende waarden voor de hydraulische parameters, werd voor elke laag een initieel stel van hydraulische parameters in het model gebracht. Door middel van opeenvolgende simulaties werden voor elke laag de hydraulische parameters bepaald waarbij de berekende tijd-verlagingscurven en de berekende afstand-verlagingscurven zo goed mogelijk overeenstemmen met de waargenomen verlagingen (fig. 7). Dit betekent dat de in het mathematisch model ingebrachte hydraulische parameters (fig. 6) de werkelijke hydraulische parameters benaderen.

De plaats en de vorm van de berekende tijd-afstand-curven in de aangepompte laag (laag 3) is zeer sterk afhankelijk van de horizontale doorlatendheid en de specifieke elastische berging van de aangepompte laag zelf; in afnemende belangrijkheid is deze ook nog afhankelijk van de hydraulische weerstanden tussen de aangepompte laag (laag 3) en de aangrenzende halfdoorlatende lagen (respectievelijk laag 2 en 4), de specifieke elastische berging van de aangrenzende halfdoorlatende lagen (laag 2 en 4) en de hydraulische weerstanden tussen de niet-aangrenzende lagen (respectievelijk laag 1 en 2 en laag 4 en 5).

De overige parameters beïnvloeden slechts in geringe mate de verlaging in de aangepompte laag. Het zijn dan ook deze parameters, die met een mindere graad van nauwkeurigheid kunnen bepaald worden.

De plaats en de vorm van de tijd-verlagingscurven van de aangrenzende halfdoorlatende lagen (laag 2 en 4) worden niet alleen bepaald door de horizontale doorlatendheid en de specifieke berging van de aangepompte laag, maar ook door de hydraulische weerstand tussen deze halfdoorlatende lagen (laag 2 en 4) en de aangepompte doorlatende laag (laag 3) en door hun specifieke elastische berging. De verlaging in de niet-aangrenzende doorlatende laag (laag 1) is zowel afhankelijk van de reeds hoger vermelde parameters als van de hydraulische parameters van de laag zelf. Gezien deze afhankelijkheid van het groot aantal parameters, is het moeilijk de hydraulische parameters van deze laag nauwkeurig te bepalen.

Aangezien geen verlagingen in laag 5 werden opgenomen, zijn de ingebrachte hydraulische parameters gekozen naar analogie met gelijkaardige afzettingen. Deze worden ingebracht om de berekeningen mogelijk te maken. Ze kunnen echter niet beschouwd worden als parameters die door toepassing van het model worden afgeleid.

Vergelijking van de verschillende waarden voor de hydraulische parameters van de aangepompte laag (laag 3) leert dat de waarden, bekomen voor de transmissiviteit en de elastische bergingscoëfficiënt door

toepassing van het mathematisch model, het best benaderd worden door deze bepaald uit de afstand-verlagingscurven op het einde van de pompproef (methode van DE GLEE) en de tijd-verlagingscurven (methode van WALTON) van de dichtste stijghoogtebuizen. Toepassing van de methode van WALTON geeft grotere afwijkingen voor de hydraulische weerstand. De reciproke waarde van de hydraulische weerstand bepaald uit de verlaging in de aangepompte laag met de klassieke analytische methode benadert de som van de reciproke waarden van de hydraulische weerstanden van de aangrenzende halfdoorlatende lagen zoals afgeleid met het mathematisch model. De hydraulische weerstand van de bovenliggende laag is er 385 ($340 + 45$); de hydraulische weerstand van de onderliggende laag is er 1120 ($720 + 400$), waaruit de waarde 287 resulteert. Dat de waarde bepaald volgens de methode van DE GLEE hoger ligt, is te wijten aan het feit dat op het einde van de pompproef (na 3 dagen pompen) de permanente grondwaterstroming nog niet bereikt is.

Wat de berekende hydraulische parameters van de aangrenzende doorlatende en halfdoorlatende lagen betreft, valt de zeer lage bergingscoëfficiënt op van laag 2. De enige mogelijkheid om de berekende tijd-verlagingscurve te laten samenvallen met de waargenomen, was het toekennen van een zeer lage waarde voor de specifieke elastische berging ($3,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$). Dit is slechts één orde groter dan het gedeelte van de specifieke elastische berging die kan toegeschreven worden aan de samendrukbaarheid van water (DOMENCIO, 1972).

Deze lage waarde zou wijzen op een weinig samendrukbare laag. De samendrukbaarheid werd eveneens nagegaan door een samendrukkingproef op een ongeroerd monster van deze laag. Deze proef werd uitgevoerd door het Rijksinstituut voor Grondmechanica en leverde een normale waarde op voor de specifieke elastische berging. Indien een normale waarde voor de specifieke elastische berging in de orde van 10^{-5} m^{-1} in rekening gebracht wordt dan treedt de berekende verlaging in deze halfdoorlatende laag beduidend later op dan de waargenomen verlaging. Deze te vlug optredende verlaging in deze stijghoogtebuis zou dan moeten verklaard worden door een vluigere voortplanting van de druksdaling langs het met de kleistop voorziene boorgat dan langs de laag zelf. De opgenomen verlaging in de stijghoogtebuis geplaatst in de halfdoorlatende laag leverde ons dus twijfelachtige resultaten op. Een betere methode om de verlaging in een halfdoorlatende laag te volgen moet dus gekozen worden.

Twee problemen doen zich voor bij de plaatsing van stijghoogtebuizen in halfdoorlatende lagen. Het eerste probleem is dat er een wateruitwisseling gebeurt tussen de stijghoogtebuis en de laag. Hierdoor bestaat een stijghoogteverschil tussen de stijghoogtebuis en de laag. Dat verschil is een functie van het uit-

sijpelend debiet (snelheid van verlaging en diameter stijghoogtebuis) en van de doorlatendheid van de laag. Dit probleem kan worden verholpen door de wateruitwisseling zoveel mogelijk te beperken of uit te sluiten. Het tweede probleem is dat van de afdichting van de stijghoogtebuis in de halfdoorlatende laag. Een kleistop over een voldoende lengte moet aanwezig zijn zowel onder als boven de stijghoogtebuis.

5. BESLUIT

Uit twee voorbeelden blijkt dat bij de interpretatie van pompproeven een mathematisch model toelaat meer hydraulische parameters af te leiden dan met de klassieke analytische methoden. Men maakt hierbij niet alleen gebruik van de verlaging in de aangepompte lagen maar ook van die in de aangrenzende lagen. Hierdoor kan men met grotere nauwkeurigheid de hydraulische parameters van de aangepompte en van de aangrenzende lagen berekenen.

De hydraulische parameters hebben echter niet dezelfde graad van nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid van de parameters neemt af naarmate de laag verder van de aangepompte laag verwijderd is. Om deze reden is het dan ook aan te raden om in een complex grondwaterreservoir van verschillende doorlatende en halfdoorlatende lagen, de doorlatende lagen afzonderlijk te bemalen en telkens de verlagingen in alle lagen te volgen.

REFERENTIES

- BEAR, J. (1984). *Hydraulics of Groundwater*, 569 p., New York: Mc Graw-Hill.
- DOMENICO, P.A. (1972). *Concepts and models in groundwater hydrology*, 405 p., New York: Mc Graw-Hill.
- GOTTSCHALK, M.K.E. (1955). *Historische geografie van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen tot aan de St.-Elisabethsvloed van 1404*, 221 p., Assen.
- HANTUSH, M.S. (1960). Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*, V 65, n° 11, 3713-3725.
- HANTUSH, M.S. (1961). Drawdown around a partially penetrating well. *Am. Soc. Civil Eng. Proc.*, 87, HY4, 83-98.
- JAKOSKY, J.J. (1957). *Exploration geophysics*, 2nd edition, 1195 p., Newport Beach, Calif.: Trija Publishing Company.
- KRUSEMAN, G.P. en DE RIDDER, N.A. (1970). Analysis and evaluation of pumping test data. *Bull. I.R.I* 11, 1-200.
- LEBBE, L. (1983). Een mathematisch model voor de niet-permanente grondwaterstroming naar een pompput in een veellagig grondwaterreservoir en enkele beschouwingen over de stroomtijd. *Tijdschr. Becewa* 70, 33-48.
- LEBBE, L., DE BREUCK, W. en BOLLE, I. (1983). Salt-water encroachment in the western Belgian coastal plain. *Proc. 6th Salt Water Intrusion Meeting*, Bari, Special issue of *Geologia Applicata e Idrogeologie* (in druk).
- NEUMAN, S.P. en WITHERSPOON, P.A. (1972). Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. *Wat. Resources Res.* 8, 1284-1298.
- TODD, D.K. (1980). *Groundwater hydrology*, 2nd edition, 535 p., New York: John Wiley and Sons.
- VERRUIJT, A. (1969). Elastic storage of aquifers. In: *Flow through porous media* (R.G.M. De Wiest, ed.) p. 331-376. New York: Academic Press.
- WALTON, W.C. (1970). *Groundwater resource evaluation*, 664 p., New York: Mc Graw-Hill.
- WEEKS, E.P. (1969). Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer-test analysis. *Wat. Resources Res.*, 5, 196-214.

DANKWOORD

De auteurs danken iedereen die hebben bijgedragen bij het tot stand komen van dit artikel.

De pompproef in de Binnenduinen van Adinkerke is uitgevoerd in het bestek van een F.K.F.O.-onderzoek. De hulp van Prof. Dr. W. DE BREUCK en zijn medewerkers (Leerstoel Toegepaste Geologie) was hierbij onmisbaar. De pompproef in de Zwarte-Sluispolder te Assenede is doorgegaan dankzij de samenwerking van Dr. P. LAGA, geoloog van de Belgische Geologische Dienst, en van het Bestuur van de Zwarte-Sluispolder. Deze pompproef is uitgevoerd in het bestek van een specialisatie-beurs van het I.W.O.N.L.

Tenslotte danken we Ir. P. DE SCHRIJVER voor zijn belangstelling voor de problemen welke zich gedurende de interpretatie van de pompproef stelden; hierdoor was het mogelijk twee samendrukkingsproeven in het Rijksinstituut voor Grondmechanica te Gent, te laten uitvoeren.

VLIZ (vzw)
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
FLANDERS MARINE INSTITUTE
Oostende - Belgium