

ENKELE RESULTATEN VAN DE BEPALING
VAN HYDROLOGISCHE CONSTANTEN IN HET
PRUNJE GEBIED (SCHOUWEN-DUIVELAND)

Dr. J. WESSELING

ENKELE RESULTATEN VAN DE BEPALING VAN HYDROLOGISCHE CONSTATEN UIT GETIJWAARNEMINGEN IN HET PRUNJEGBIED (Schouwen - Duiveland)

J. WESSELING¹

SOME RESULTS OF THE DETERMINATION OF HYDROLOGICAL CONSTANTS FROM THE TRANSMISSION OF TIDAL WAVES IN THE PRUNJE AREA (SCHOUWEN-DUIVELAND).

SUMMARY

The phenomenon of the transmission of tidal waves in hydrological basins gives us a method of determining some hydrological constants, because there is a certain relationship between the damping and the phaseshift of the tidal waves and the hydrological properties of the basin. As is shown by Steggewentz the tidal movement in the open water can be expressed by eq. (1), the transmission of this movement in the basin then being given by eq. (2). It is obvious from these equations that the amplitude of the piezometric head of the groundwater is diminished by a factor $e^{-\alpha x}$ where x is the distance from the sea. The phaseshift is given by βx . For a rigid artesian basin Steggewentz derived for the relation between α and β and the hydrological constants eqs. (3) and (4), in which μ is the storage capacity of the upper layer and c is the vertical resistance of this layer (thickness divided by hydraulic conductivity). Further KD is the transmissibility of the aquifer and $n = \frac{2\pi}{T}$ T being the period of the tide.

For an elastic artesian aquifer Bosch (1951) derived eqs. (5) and (6), where S is a storage factor containing the elasticity of the aquifer and the water confined within it.

In the Prunje area observation wells (fig. 1) were installed at depths of about 40 m (deep), 30 m (middle) and 20 m (shallow) below surface from which measurements were taken during 3 days. From these measurements (fig. 2) the times and heights of maxima and minima have been determined (table Ia and Ib).

According to eq. (8) the natural logarithm of the mean value of the damping $\frac{Sx}{S}$ where S is the amplitude of the sea and Sx the amplitude at a distance x from the sea, have been plotted against the distance giving the value of α . Due to an unknown resistance between the sea and the first observation well the lines did not pass through the origin. Taking the first observation well as reference instead of the

sea means a parallel displacement of the lines. The points, therefore, were adjusted, taking the distances certain. The same has been done for the mean value of the phaseshift. The results are given in fig. 3. The slopes of these lines giving α and β , the hydrological constants can be calculated with the aid of eq. (3) and (4) for a rigid basin or (5) and (6) for an elastic basin (table III).

The values of KDc calculated for an elastic basin agree very well with the interpretation of the borings. The values of KDc calculated for a rigid basin are too small. This fact may be ascribed to the very low value of c which was already found in earlier investigations with this method (Wesseling, 1959).

SAMENVATTING

Indien een bepaald gebied grenst aan open water waarin een getijbeweging voorkomt, kan van de voortplanting van deze getijbeweging in het grondwater gebruik worden gemaakt om bepaalde hydrologische constanten te berekenen. In het geval van het Prunjegebied waar het watervoerend pakket wordt afgedekt door een kleilaag kan men gebruik maken van de voor de voortplanting in spanningsgrondwater geldende vergelijkingen.

Een beschrijving van het verband tussen fasevertraging en demping enerzijds en de hydrologische constanten anderzijds wordt gegeven in par. 2.

Voor de berekening wordt de getijbeweging in het grondwater op verschillende afstanden van het open water nagegaan. De bewerking van de verkregen gegevens wordt aan de hand van een voorbeeld gegeven in par. 4.

Uit de resultaten blijkt, dat, wanneer de samendrukbaarheid van het watervoerend pakket in rekening wordt gebracht men waarden voor KDc krijgt die redelijk goed overeenstemmen met de uit de boringen verkregen waarden. Houdt men daarentegen geen rekening met de samendrukbaarheid van het watervoerende pakket, dan komt men, tot reeds bij andere onderzoeken gevonden, zeer kleine c -waarden van de afdekkende laag.

1. INLEIDING

Voor de vaststelling van de hydrologische omstandigheden in een bepaald gebied, hetzij voor de beschrijving van de huidige toestand, hetzij voor de voorspelling van mogelijke verande-

¹ Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

ringen in de toekomst kunnen verschillende wegen worden gevolgd. Veelal zal men verschillende methoden naast elkaar gebruiken om een onderlinge vergelijking mogelijk te maken of om mogelijke fouten of tekortkomingen op te sporen of aan te vullen. De omstandigheid dat een gebied grenst aan open water waarin zich een getijbeweging voordoet, geeft de mogelijkheid om uit de voortplanting van deze getijbeweging in het gebied een uitspraak te doen over de waarde van bepaalde hydrologische constanten van de bodem. Een dergelijk geval doet zich voor in het gebied van de Prunje op Schouwen-Duiveland, waar in het kader van het Delta-onderzoek een groot aantal waarnemingen zijn of worden verricht door verschillende instellingen. De in dit gebied geplaatste peilfilters werden ook gebruikt voor de vaststelling van de hydrologische constanten uit de voortplanting van de getijbeweging. De daarbij gevolgde werkwijze en de verkregen resultaten worden in onderstaand artikel behandeld.

2. PHYSISCH-HYDROLOGISCHE GRONDSLAGEN

Een getijbeweging in het open water plant zich in het aangrenzende land voort. Deze voortplanting kan worden gezien als een langzaam uitdempende golfbeweging. Naarmate immers de afstand tot het open water groter wordt zal de golfbeweging kleiner zijn, terwijl maxima en minima in de stijghoogten naar een later tijdstip worden verplaatst. De mate van demping en fasevertraging van een dergelijke golfbeweging hangt uiteraard af van de hydrologische eigenschappen van de grond. In het gebied van de Prunje bestaat de bodem hydrologisch geschematiseerd uit één of meer watervoerende pakketten, afgedekt door een min of meer slecht doorlatende kleilaag. Het water in dit pakket mag dan ook worden beschouwd als spanningswater.

Wordt de getijbeweging in het open water weergegeven door de sinusfunctie

$$\phi = M + S \sin nt \quad (1)$$

dan geldt volgens Steggewentz (1933) voor de verandering van de stijghoogte in het watervoerende pakket

$$\phi = M + S e^{-\alpha x} \sin (nt + \beta x) \quad (2)$$

waarin:

ϕ = de stijghoogte van het water gerekend vanaf de basis van het watervoerende pakket,

M = de gemiddelde (halftij-)stand van het open water,

S = de amplitude van de golfbeweging van

het open water (halve verschil tussen maximum en minimum),

n = de frequentie van de golfbeweging

($n = \frac{2\pi}{T}$ waarin T de trillingstijd is),

t = de tijd,

x = de afstand tot het open water.

Wordt geen rekening gehouden met de samendrukbaarheid van het watervoerende pakket en het zich daarin bevindende water, dan geldt volgens Steggewentz het volgende verband tussen α en β enerzijds en de hydrologische constanten anderzijds

$$\frac{(\alpha^2 + \beta^2)^2}{2\alpha\beta} = \frac{n\mu}{KD} \quad (3)$$

$$\frac{\alpha^2 - \beta^2}{2\alpha\beta} = \mu c n \quad (4)$$

waarin KD het geleidend vermogen van het watervoerend pakket, c de verticale weerstand en μ het bergend vermogen van de afdekkende laag voorstellen.

Wordt de samendrukbaarheid van het watervoerend pakket en het zich daarin bevindende water wel in rekening gebracht dan geeft Bosch (1951) als verband tussen α en β enerzijds en de hydrologische constanten anderzijds

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{KDc} \quad (5)$$

$$2\alpha\beta = \frac{Sn^2}{KD} \quad (6)$$

waarin S een bergingsfaktor is die bepaald wordt door de dikte van het watervoerend pakket, de dichtheid van het water en de elasticiteitsmoduli van water en grond.

De oplossing van Bosch geldt voor het geval de stijghoogte van het water in het afdekkende pakket constant is. Brengt men eventuele veranderingen in dit pakket in rekening, dan worden veel ingewikkelder vergelijkingen verkregen (Wesseling, 1959) waarvan het resultaat slechts weinig verschilt van de verg. 5 en 6 vanwege de kleine veranderingen die in het bovenpakket optreden.

Volgens verg. 2 is de beweging in het grondwater eveneens sinusoidaal. De amplitude van deze beweging is een factor $e^{-\alpha x}$ maal zo klein als de amplitude van de golfbeweging van het open water, terwijl de fasevertraging βx bedraagt. De verhouding van de amplitude op een willekeurige afstand x , voorgesteld door Sx en die van het open water is dus volgens verg. 1 en 2

$$\frac{Sx}{S} = \frac{Se^{-\alpha x}}{S} = e^{-\alpha x} \quad (7)$$

of

$$e_{\log} \frac{Sx}{S} = -ax \quad (8)$$

Wordt dus de natuurlijke logarithme van de amplitudeverhouding uitgezet tegen de afstand x , dan zal een rechte lijn door de oorsprong moeten ontstaan met een helling $-a$.

Wordt voor een aantal waarnemingspunten de fasevertraging (in radialen) uitgezet tegen de afstand tot het open water, dan zal een rechte lijn ontstaan met helling β . De waarden van a en β kunnen dus op vrij eenvoudige wijze worden bepaald, namelijk door op verschillende afstanden uit het open water amplitude en fasevertraging te bepalen en deze uit te zetten tegen de afstand.

3. WAARNEMINGEN

Als waarnemingspunten werden de plaatsen gebruikt waarop door de Geologische Afdeling van het I.C.W. puls- en spoelboringen werden uitgevoerd (zie fig. 1). Deze boorpunten werden afgewerkt tot waarnemingsputten met peilfilters op een diepte van ca. 40, 30 en 20 m beneden maaiveld, welke in het vervolg zullen worden aangeduid met *diep*, *middel* en *ondiep*. De waarnemingsputten worden voor ons doel in de periode 25 mei 1959, 17.00 uur tot 28 mei 1959, 16.00 uur elk uur opgenomen. Voor deze periode konden de zeestanden worden ontleend aan de zelfregistrerende peilschaal van Rijkswaterstaat te Burgsluis.

De afstand van elk peilfilter tot de zee werd bepaald uit de daartoe door de Landmeetkundige Dienst van het Bureau van Uitvoering van de Herverkaveling Schouwen-Duiveland uitgevoerde lengtemeting. Als afstand voor elk filter werd de kortste afstand tot de hoogwaterlijn genomen.

4. VERWERKING VAN DE WAARNEMINGEN

Voor de verwerking werden de opgenomen peilfilters ondergebracht in de raaien I t/m V (zie fig. 1). De opgenomen stijghoogten van de zee en elk filter werden daarna op een passende schaal uitgezet. De daarbij verkregen punten werden door een vloeiende lijn verbonden. Fig. 2 geeft hiervan een voorbeeld. Het blijkt dat de aldus verkregen lijnen geen zuivere sinusvorm vertonen. De maxima en minima zijn namelijk niet voor elk getij gelijk. Er is dan ook afgezien van een cyclometrische vereffening van de waarnemingen. In plaats hiervan werd voor elk maximum en minimum hoogte en tijdstip van optreden zo goed mogelijk vastgesteld uit de verkregen lijnen. Tabel 1a geeft de hoogten van maxima en minima, alsmede de amplituden voor de zee en voor filter K 105 van figuur 2. Als amplitude werd steeds het verschil tussen een maximum en daaropvolgend minimum of omgekeerd genomen.

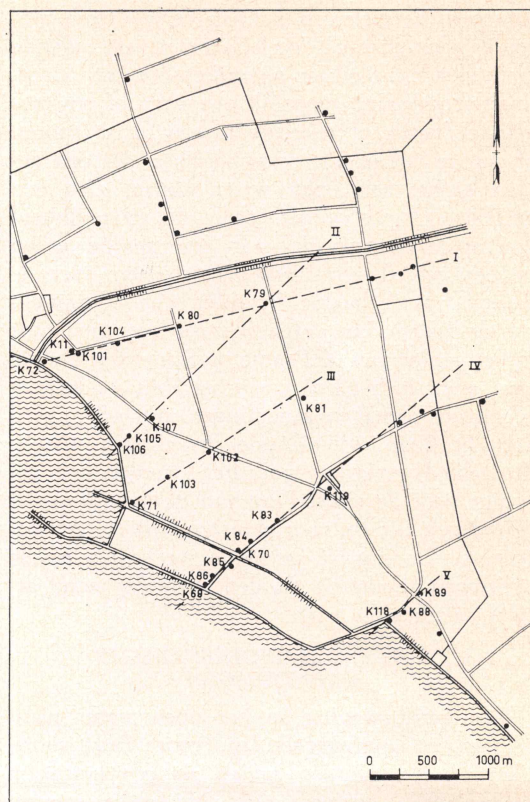


Fig. 1 — Overzicht van de gebruikte peilfilters in het Prunjegebied.

Location of observation wells in the Prunje area.

In tabel Ib zijn de tijden waarop maxima en minima optreden weergegeven voor de zee en buis K 105 van figuur 2. Uit het verschil in tijd kan de fasevertraging worden bepaald.

Uit de gegevens van tabel Ia kan de amplitudeverhouding worden bepaald. De amplituden blijken een vrij constante waarde te hebben. Een groot deel van de verschillen is toe te schrijven aan de amplitudeverschillen in het open water. Dit blijkt temeer, wanneer uit tabel Ia de amplitudeverhoudingen worden berekend. Deze waarden zijn samen met de fasevertraging in radialen in tabel II opgegeven. Voor de berekening van de laatste waarden kan uit figuur 2 worden afgeleid dat een uur overeenkomt met 0,5 radialen.

In tabel Ib doet zich geen systematisch verschil in fasevertraging tussen de *diepe*, *middel* en *ondiepe* buizen voor. In andere waarnemingspunten blijken deze echter wel voor te komen. Daarom werd de fasevertraging voor elke diepte afzonderlijk bepaald. Van getij tot getij blijken wel grote verschillen in fasevertraging op te treden. Deze bedragen soms een factor twee.

De aldus berekende waarden voor de am-

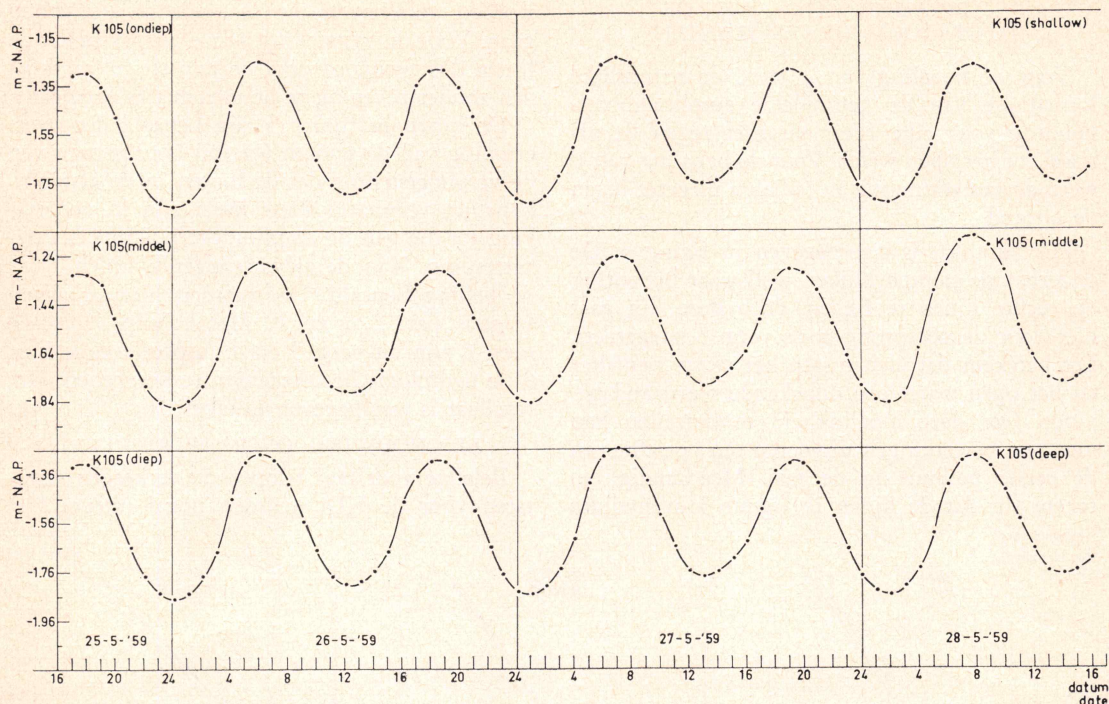


Fig. 2 — Verkregen waarnemingen voor filter K 105.
Observations for well K 105.

plitudeverhouding en fasevertraging werden gemiddeld en dit gemiddelde werd voor de berekening van α en β gebruikt. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat niet alle opgenomen filters zich leenden voor een dergelijke bewerking. Over

het algemeen kan worden gezegd dat bij afstanden groter dan ongeveer 500 m de getijbeweging in de filters zo klein was (0 à 4 cm) dat hieruit maxima en minima niet meer betrouwbaar waren vast te stellen.

Tabel I a — Hoogten van maxima en minima en daaruit bepaalde amplituden voor de zee en filter K 105.

Values of maxima and minima and the amplitudes determined from them for the sea and tube K 105.

	Hoogten van max en min				amplitude			
	zee	ondiep	middel	diep	zee	ondiep	middel	diep
maximum	+1.50	—1.30	—1.31	—1.31	—	—	—	—
minimum	—1.72	—1.85	—1.87	—1.87	3.22	0.55	0.56	0.56
maximum	+1.67	—1.25	—1.27	—1.28	3.39	0.60	0.60	0.59
minimum	—1.43	—1.80	—1.82	—1.82	3.10	0.55	0.55	0.54
maximum	+1.50	—1.28	—1.30	—1.30	2.93	0.52	0.52	0.52
minimum	—1.63	—1.84	—1.85	—1.85	3.13	0.56	0.55	0.55
maximum	+1.68	—1.24	—1.25	—1.26	3.31	0.60	0.60	0.59
minimum	—1.30	—1.76	—1.78	—1.76	2.98	0.52	0.53	0.52
maximum	+1.41	—1.29	—1.30	—1.31	2.71	0.47	0.48	0.47
minimum	—1.72	—1.84	—1.85	—1.86	3.13	0.55	0.55	0.55
maximum	+1.52	—1.27	—1.16	—1.29	3.24	0.57	0.69	0.57
minimum	—1.24	—1.76	—1.77	—1.77	2.76	0.59	0.61	0.48
	sea	shallow	middle	deep	sea	shallow	middle	deep
	Values of max and min				amplitude			

5. BEPALING VAN α , β EN DE HYDROLOGISCHE CONSTANTEN

Voor de bepaling van α werd de natuurlijke logaritme van de gemiddelde amplitude verhouding voor elke filter uitgezet tegen de afstand tot het open water. Voor de bepaling van β werd de fasevertraging in radialen uitgezet tegen de afstand.

Het resultaat is weergegeven in figuur 3. De onderhavige punten blijken weliswaar behoorlijk op rechte lijnen te liggen, doch deze lijn gaat niet door de oorsprong zoals verg. 8 suggereert. Dit betekent dat zich tussen het eerste peilfilter en het open water een onbekende weerstand bevindt. Om deze moeilijkheid te omzeilen kan men alle bewerkingen uitvoeren ten opzichte van de eerste peilbuis in de raai. Meetkundig betekent dit dat de lijnen in figuur 3 evenwijdig

worden verschoven tot ze door de oorsprong gaan. Voor de vaststelling van α en β kunnen de lijnen dus evengoed door de punten gelegd worden zonder rekening te houden met de oorsprong.

De lijnen in figuur 3 zijn bepaald door vereffening van de punten waarbij is uitgegaan van de veronderstelling dat de fouten in de afstands-bepaling verwaarloosbaar klein zijn in vergelijking tot die van de amplitudeverhouding en fasevertraging. Van de aldus vereffende lijnen werd de helling bepaald. De waarden hiervan geven volgens par. 2 α en β . Met behulp van deze α en β zijn uit verg. 3 en 4, respectievelijk 5 en 6 de hydrologische constanten te berekenen. Het resultaat is weergegeven in tabel III.

6. BESCHOUWING OVER DE RESULTATEN

Behalve voor raai I lopen de verkregen resultaten voor de KDC-waarden nogal uiteen. Het

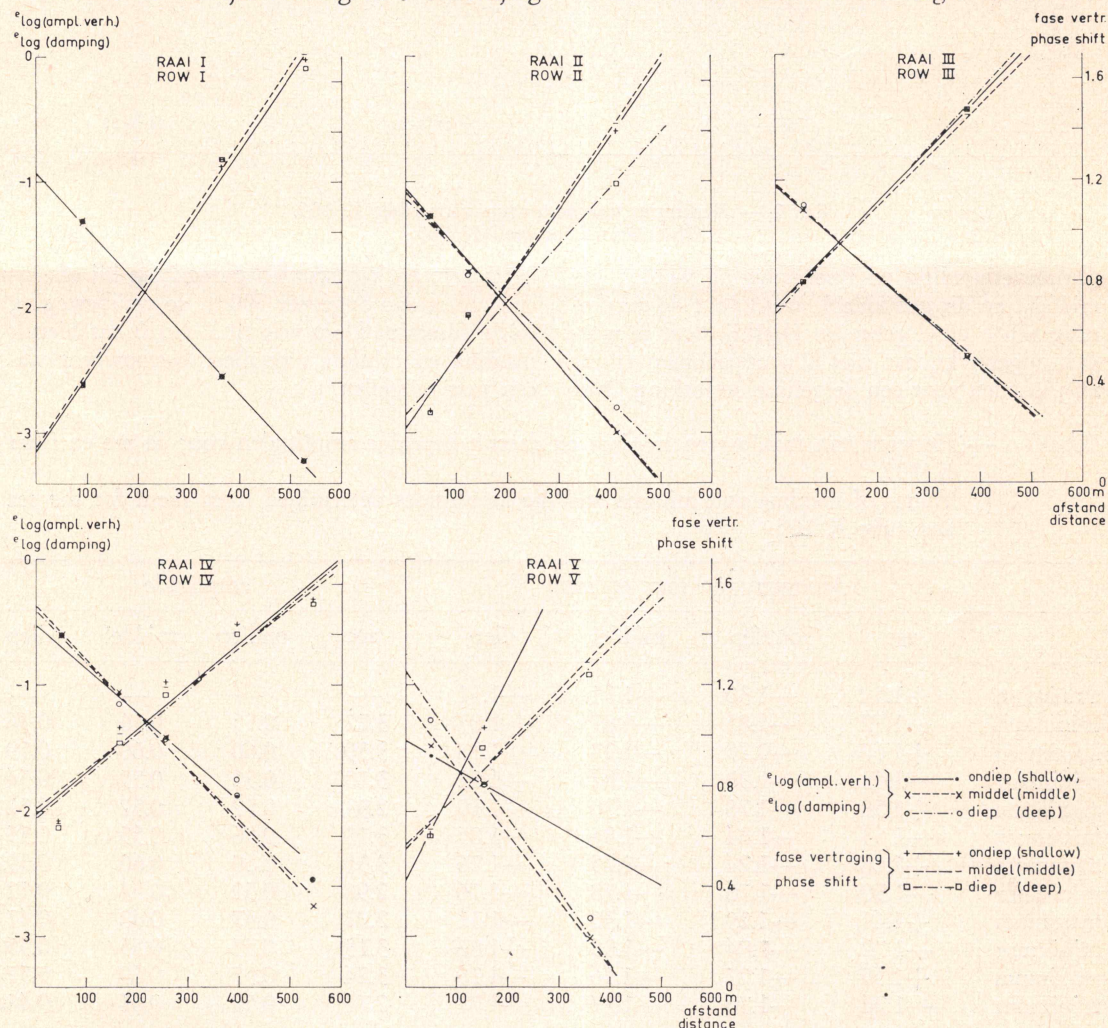


Fig. 3 — Vereffening van de gemiddelde waarden voor amplitudeverhouding en damping voor de bepaling van α en β .
Adjustment of the mean values of the natural logarithm of the damping and the phaseshift, used in order to obtain α and β .

Tabel Ib — Tijden van maxima en minima en de daaruit bepaalde fasevertraging voor filter K 105.
Times of maxima and minima and the phase shift determined from them for tube K 105.

888	Tijd van maximum of minimum			fasevertraging			
	zee	diep	middel	diep	ondiep	middel	diep
maximum	16.21	17.40	17.35	17.40	1.19	1.14	1.19
minimum	22.39	24.05	24.10	24.10	1.26	1.31	1.31
maximum	4.49	6.10	6.10	6.10	1.21	1.21	1.21
minimum	11.11	12.20	12.30	12.30	1.09	1.19	1.19
maximum	17.23	18.30	18.35	18.30	1.07	1.12	1.07
minimum	23.35	1.00	24.55	24.55	1.25	1.20	1.20
maximum	5.17	7.10	7.10	13.00	1.23	1.13	1.03
minimum	11.57	13.20	13.10	7.10	1.53	1.53	1.53
maximum	18.21	19.15	19.20	19.20	0.54	0.59	0.59
minimum	0.50	2.00	2.00	2.10	1.10	1.10	1.20
maximum	6.21	8.05	8.05	8.00	1.44	1.44	1.39
minimum	13.05	14.10	14.10	14.10	1.05	1.05	1.05
	sea	shallow	middle	deep	shallow	middle	deep
	Time of maximum or minimum			phase shift			

maximale verschil tussen de grootste en de kleinste waarde in een raai ligt ongeveer bij 20 %. Voor $\frac{S}{KD}$ wordt in raai II een nogal groot verschil gevonden; hetzelfde geldt voor $\frac{\mu}{KD}$ in raai II en IV en voor μc in raai II, III, IV

en V. Het watervoerend pakket blijkt dus behalve in raai I nogal inhomogeen te zijn.

Uit de boringen (van Dam en de Ridder, 1960) blijkt, dat in het watervoerend pakket op verschillende plaatsen onderbroken klei- en veenlagen voorkomen.

De lage KDc-waarde volgens Bosch in raai V

Tabel II — Uit tabel Ia en Ib berekende amplitudeverhouding en fasevertraging.
Ratio of amplitudes and phase shift calculated from table Ia and Ib.

Nr.	amplitudeverhouding			fasevertraging (rad.)		
	ondiep	middel	diep	ondiep	middel	diep
1	0.17	0.17	0.17	0.658	0.617	0.658
2	0.18	0.18	0.17	0.717	0.758	0.758
3	0.18	0.18	0.17	0.675	0.675	0.675
4	0.18	0.18	0.17	0.575	0.658	0.658
5	0.18	0.18	0.18	0.558	0.600	0.558
6	0.18	0.18	0.18	0.708	0.667	0.667
7	0.17	0.18	0.17	0.942	0.942	0.942
8	0.17	0.18	0.17	0.692	0.608	0.525
9	0.18	0.18	0.18	0.450	0.492	0.492
10	0.18	0.20	0.18	0.583	0.583	0.669
11	0.18	0.21	0.17	0.542	0.867	0.825
12	—	—	—	—	0.542	0.542
GEM.	0.180	0.180	0.176	0.664	0.666	0.665
	shallow	middle	deep	shallow	middle	deep
	ratio of amplitudes			phase shift (radians)		

Tabel III — Berekende hydrologische constanten.
Calculated hydrological constants.

Raai	$\alpha.10^3$	$\beta.10^3$	Bosch verg. (5) en (6)		Steggewentz verg. (3) en (4)		
			KDc	$\frac{S}{KD} \cdot 10^6$	$\frac{\mu}{KD} \cdot 10^4$	$\mu c \cdot 10^4$	KDc
I ondiep	4.40	3.00	96.525	2.20	2.54	327	12.800
middel	4.40	3.05	99.428	2.24	2.55	312	12.235
diep	4.40	3.00	96.525	2.20	2.54	327	12.800
II ondiep	4.70	2.90	73.099	2.27	2.84	418	14.718
middel	4.60	2.98	81.436	2.28	2.74	373	13.613
diep	4.00	2.26	91.807	1.51	2.05	502	24.487
III ondiep	3.63	2.10	114.065	1.27	1.69	479	28.343
middel	3.69	2.00	103.992	1.23	1.77	543	30.678
diep	3.56	2.20	127.655	1.30	1.63	417	25.582
IV ondiep	3.50	1.70	106.837	0.99	1.61	655	40.683
middel	4.35	1.60	61.115	1.16	2.76	980	35.507
diep	3.00	1.69	162.763	0.85	1.15	505	43.913
V middel	5.20	2.10	44.189	1.82	3.85	863	22.416
diep	5.90	1.96	32.291	1.93	5.38	1116	20.743

Row	Bosch eq. (5) and (6)		Steggewentz eq. (3) and (4)	
-----	--------------------------	--	--------------------------------	--

komt goed overeen met de boringen. De hoge waarden van KDc in raai III en IV moet volgens deze boringen worden toegeschreven aan de dikere afdekkende kleilaag terplaatse en daardoor een grotere c-waarde.

Voor boring K 106 werd uit laboratoriummetingen van de doorlaatfaktor een c-waarde vastgesteld van 750 bij een ongeveer 8 m dikke afdekkende kleilaag. Uit de boring werd verder een $KD = 200$ afgeleid. Bedenkt men, dat verder uit de kust de dikte van de afdekkende kleilaag met 2 à 3 m afneemt, dan zal de c-waarde in raai II ongeveer gemiddeld 500 zijn. Bij een $KD = 200$ geeft dit een $KDc = 100.000$. Dit komt dus goed overeen met de berekening volgens Bosch. De berekeningen volgens Steggewentz geven een veel lagere KDc-waarde. Stelt men in raai II hierbij $c = 500$, dan geeft dit bij een $\mu c = 450.10^{-4}$ een $\mu \approx 10^{-4}$. Deze

waarde ingevuld in de waarde van $\frac{\mu}{KD} \approx 2,5.10^{-6}$ geeft voor $KD = 40$, hetgeen volgens de boringen te klein is. Stelt men echter $KD =$

200, dan volgt uit de gegevens dat $\mu \approx 5.10^{-4}$. Dit komt bij een $\mu c = 450.10^{-4}$ overeen met een c-waarde van 90. Deze opmerkelijk lage c-waarde uit de berekeningen volgens Steggewentz werd reeds bij eerder onderzoek (Wesseling, 1959) gevonden.

De verkregen resultaten wijzen er hier dus ook op, dat men bij dergelijke hydrologische problemen rekening moet houden met de samen-drukbaarheid van het pakket.

LITERATUUR

- Bosch, H., (1951) — Geo-Hydrologisch onderzoek Bergambacht. Hydr. Coll. HC(S) nr. 255 A (stencil).
- Dam, J. C. van en N. A. de Ridder (1960) — Enige aspecten van het geohydrologisch onderzoek in Zuidwest Nederland. Geologie en Mijnbouw, N.S. 21, p. 603-620.
- Steggewentz, J. H. (1933) — De invloed van de getijbeweging van zeeën en getijrivieren op de stijghoogte van het grondwater. Proefschrift Delft.
- Wesseling, J. (1959) — The transmission of tidal waves in elastic artesian basins. Neth. J. of Agric. Sci. Vol. 7 p. 22-32.