

Getijde-respons in grondwater onder Nederlandse dijken

1. Inleiding

De bescherming van het Nederlandse laagland wordt gerealiseerd door een uitgebreid netwerk van dijken en kaden langs rivieren, kanalen en boezemkaden. Voor het keren van hoge waterstanden, die optreden als gevolg van regenwater- en smeltwaterafvoer over rivieren en als gevolg van zee-storm-intrusie in de kustgebieden, moeten de dijken en dammen verstevigd en op hoogte gehouden worden. Voor het keren van met hoogwater samenhangende stroming door de ondergrond is de aanwezige geologische



IR. CHR. M. H. L. G. BAUDUIN
Grondmechanica Delft



DR. IR. F. B. J. BARENDIS
Grondmechanica Delft

gelaagdheid bepalend. In Nederland wordt deze gekenmerkt door een relatief on-doorlatende toplaag (holoceen) gelegen op een relatief doorlatend zandpakket (pleistoceen): het Hollandse profiel. Voor het beoordelen van de kwaliteit van de waterkering met betrekking tot de onderstroming (diepe kwel) en de grond-mechanische stabiliteit van de dijkconstructie, is inzicht in grondwaterstroming essentieel. Men pleegt dit inzicht te verkrijgen door het observeren van grondwaterdrukken tijdens hoogwater met behulp van peilbuizen geplaatst in het pleistoceen. In de literatuur, zeker ook de Nederlandse, is over dit fenomeen veel geschreven. Veel minder is bekend over de bijwerking die wordt veroorzaakt door mechanische eigenschappen van grond, met name die van het holoceen. Deze bijwerking vloeit voort uit het deformatiegedrag van grond in samenhang met de door grondwaterstroming teweeg gebrachte poriëndrukverandering: het consolidatie-proces. Vanwege dit proces dient een ander model te worden gekozen voor de getijde-respons. Voor de interpretatie van peilbuiswaarnemingen is dit aspect belangrijk. Ook bij de uitwerking van pompproeven wordt gewoonlijk geen rekening gehouden met het consolidatie-proces in de toplaag. Dit heeft gevolgen voor de uit waarnemingen gekalibreerde geo-hydrologische parameterwaarden, met name voor de zogeheten lekfactor [1]. In het volgende zal hierop worden ingegaan. Aangezien het gaat om inzicht in het mechanisme wordt ter illustratie een

geschematiseerd geologisch profiel beschouwd (afb. 1).

2. Waterdrukken in de ondergrond

Het proces van de voortplanting van waterspanningen onder een dijk naar het achterland vertoont gelijkenis met de verspreiding van warmte. Er is sprake van bergingscapaciteit, die de respons dempt en vertraagt. In principe zijn er bij grondwater-stroming drie typen berging te onderscheiden: freatische berging, consolidatie van klei (elastische berging) en compactie van zand (elastische deformatie).

In de huidige toepassing wordt gewoonlijk slechts rekening gehouden met het laatste mechanisme. Dit is onjuist. Ieder van deze mechanismen heeft een eigen tijdschaal. Dit houdt in dat een specifiek mechanisme dominant is voor een specifieke variatie in de waterstand van de rivier. Hierbij speelt de geohydrologische samenhang een belangrijke rol. Bij fluctuaties die worden gekenmerkt door getijden, stormopzet en hoge rivier-afvoer blijkt de consolidatie in de toplaag van overheersende invloed. Als de dijk deels uit zand bestaat, is bovendien de freatische berging belangrijk. Met deze wetenschap is het mogelijk een beter model op te stellen geschikt om peilbuiswaarnemingen te interpreteren en te extrapoleren naar maatgevende situaties.

3. Fysisch-mathematisch model

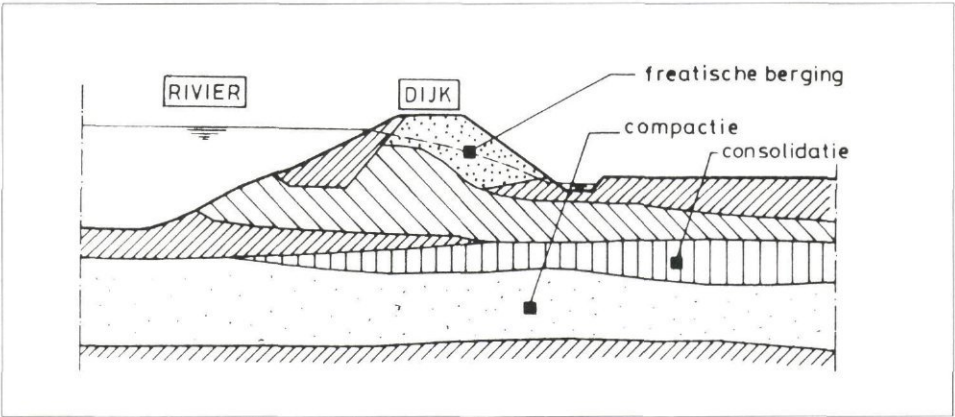
Een dijk op een klei-zand pakket (afb. 1) wordt geschematiseerd tot een systeem waarbij er sprake is van verticale elastische consolidatie in de klei, en elastische compactie in het zand (verticale elastische deformatie bij horizontale stroming).

Dit geschematiseerde proces is relevant voor situaties waarin de lengte-hoogte verhouding groot is. Uitgaande van een initiële stationaire stromingssituatie, wordt nagegaan wat een cyclische waterstands-variatie van de rivier in de ondergrond teweegbrengt aan extra drukken en kwel-stroming. Als de weerstand samenhangend met het voorland wordt verwaarloosd (afb. 2), is de cyclische respons in het pleistoceen te beschrijven met de volgende getijde-formule [2]:

$$\varphi[x,t] = H \exp[-x/\lambda_{w0}] \cos[\omega t - \alpha x/\lambda_{w0}] \quad (1)$$

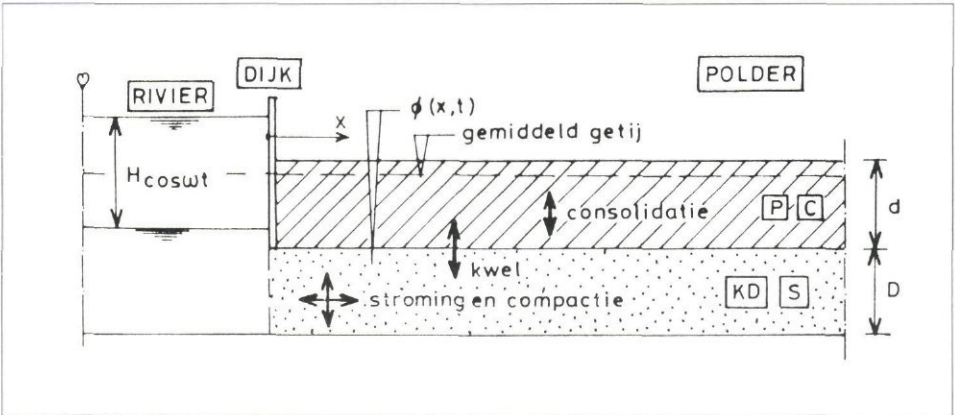
Hierin is:

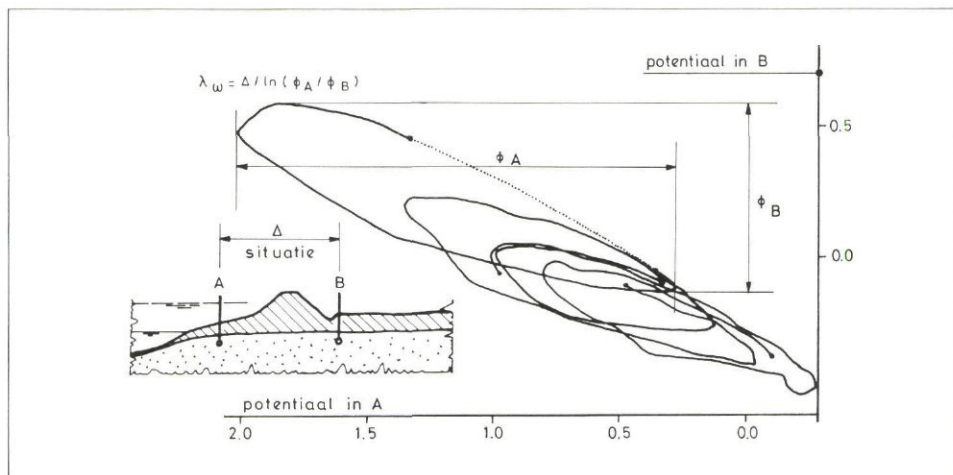
- φ stijghoogte in het watervoerend zand-pakket gerekend ten opzichte van de halftijstand
- x afstand vanaf het intreepunt (buitenteen dijk)
- t tijd
- ω hoeksnelheid van het getij
- H amplitude van de getijde-respons bij het intreepunt



Afb. 1 - Het Hollandse profiel; bergingsmechanismen.

Afb. 2 - Schematisatie dijk met achterland.





Afb. 3 - Dertienuursmeting; respons van twee peilbuizen.

De parameters λ_{ω} en α/λ_{ω} hangen respectievelijk samen met demping en vertraging. Als zodanig is deze formule gelijk aan bestaande getijdeformules. Hier hangen echter de uitdrukkingen voor λ_{ω} en α uitgedrukt in termen van fundamentele geohydrologische parameters ook samen met consolidatie. Uitwerking geeft:

$$\lambda_{\omega} = \lambda / (\cos[1/2 \arctan \epsilon]^{\frac{1}{2}} [P\omega(1+\epsilon^2)])$$

$$\alpha = \tan[1/2 \arctan \epsilon]$$

$$\epsilon = 1 + SCV[\omega/P]$$

Waarin:

λ = $\sqrt{[KDC]}$ (stationaire) lekfactor
 C = weerstand van de toplaag
 KD = doorlatend vermogen van het zandpakket
 S = elastische berging van het zandpakket (compactie)
 P = hydrodynamische periode van de toplaag (consolidatie)

Voor veel Nederlandse situaties onder dijken blijkt $\epsilon \approx 1$. Dit komt overeen met een relatief stijf zandpakket. Hiermee worden de uitdrukkingen aanzienlijk eenvoudiger:

$$\lambda_{\omega} = 1.082 \lambda / \sqrt{[P\omega]} \text{ en } \alpha = 0.414$$

De parameter λ_{ω} , de cyclische lekfactor genoemd, is karakteristiek voor het geohydrologisch systeem en de belasting-frequentie. Deze parameter kan eenvoudig bepaald worden uit een peilbuis-waarnemingen van een getijde, bijvoorbeeld een 13-uursmeting (afb. 3). De waarde van λ_{ω} is meestal aanzienlijk kleiner dan de stationaire lekfactor λ . Aangezien $\lambda_{\omega} < \lambda_{\omega}/\alpha$, is de vertraging geringer dan de demping. Dit komt overeen met waarnemingen en andere getijdeformules [3]. Essentieel anders is hier dat de consolidatie van de toplaag bepalend is en niet de elastische berging van het zandpakket.

Aan de conditie $\alpha = 0.414$ lijkt niet altijd goed te worden voldaan. Dit hangt samen

met het model en met de geschematiseerde geometrie; daarover later. De indringing van wateroverdrukken in de toplaag is van de orde $d/\sqrt{(P\omega)}$. Aangezien $P\omega$ in de meeste gevallen groot is, wordt geconstateerd, dat slechts het onderste deel van de toplaag actief meedoet. Een waterspanningsmeter geplaatst in het midden van de toplaag zal niet of zeer vertraagd reageren.

Als er wel een onmiddellijke respons wordt gesignaleerd, is dat zeer waarschijnlijk toe te schrijven aan twee-dimensionale consolidatie-effecten (horizontale spanningen).

4. Dijk met voorland (intree-weerstand)

Een veel voorkomend profiel is een dijk met een voorland. De toplaag in het voorland veroorzaakt een extra weerstand: een aanzienlijke demping, maar vreemd genoeg nauwelijks vertraging. Dit verschijnsel is reeds eerder gesignaleerd [3]. De hier gepresenteerde analyse gaat uit van een maatgevende invloed van de consolidatie in de toplaag.

De uitwerking van de getijde-respons voor een dijkprofiel met voorland levert voor het

achterland een formule op vergelijkbaar met vergelijking (1):

$$\varphi[x,t] = H \exp[-x/\lambda_{\omega} - \rho] \cos[\omega t - \alpha x/\lambda_{\omega} - \beta] \text{ voor } x > 0 \quad (2)$$

waarin:

$$\rho = \ln \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos[\gamma - \theta]}$$

$$\beta = m \sin[\gamma - \theta] / (1 + m \cos[\gamma - \theta])$$

$$\gamma = 1/2 [\arctan \epsilon - \arctan \epsilon']$$

$$m = (\lambda_{\omega}'/\lambda_{\omega}) (\cos[1/2 \arctan \epsilon] / \cos[1/2 \arctan \epsilon'])$$

$$f[b/\lambda_{\omega}']$$

$$\theta = \theta[b/\lambda_{\omega}']$$

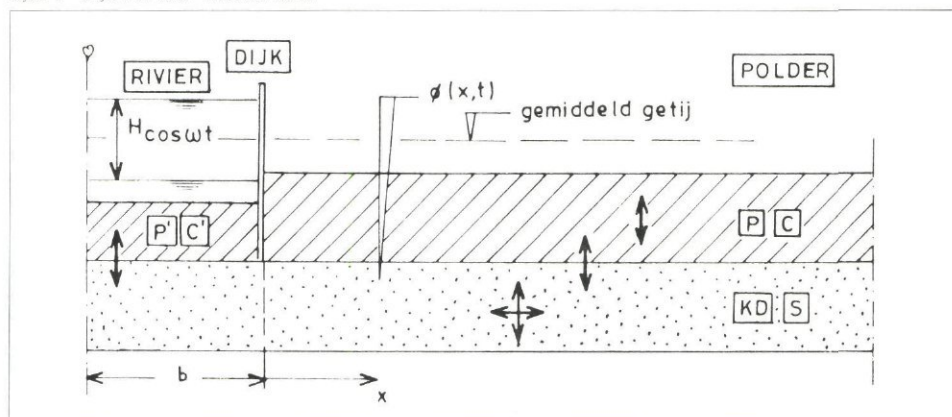
De parameters met een accent hebben betrekking op eigenschappen van het voorland. De zandlaag is in voor- en achterland identiek; de toplaag is verschillend aangenomen. De grootte H geeft de amplitude van de riviergetijde aan. De lengte b is gelijk aan de halve rivierbedbreedte (afb. 4). In de bovenstaande formule is uitgegaan van een relatief dikke toplaag: de hydrodynamische periode is groot ten opzichte van de cyclustijd van de belasting, dus $P\omega > 1$ en $P'\omega > 1$. Hieraan is in de meeste situaties bij getijde-respons voldaan. Het verband $f[b/\lambda_{\omega}']$ en $\theta[b/\lambda_{\omega}']$ is in afb. 5 aangegeven.

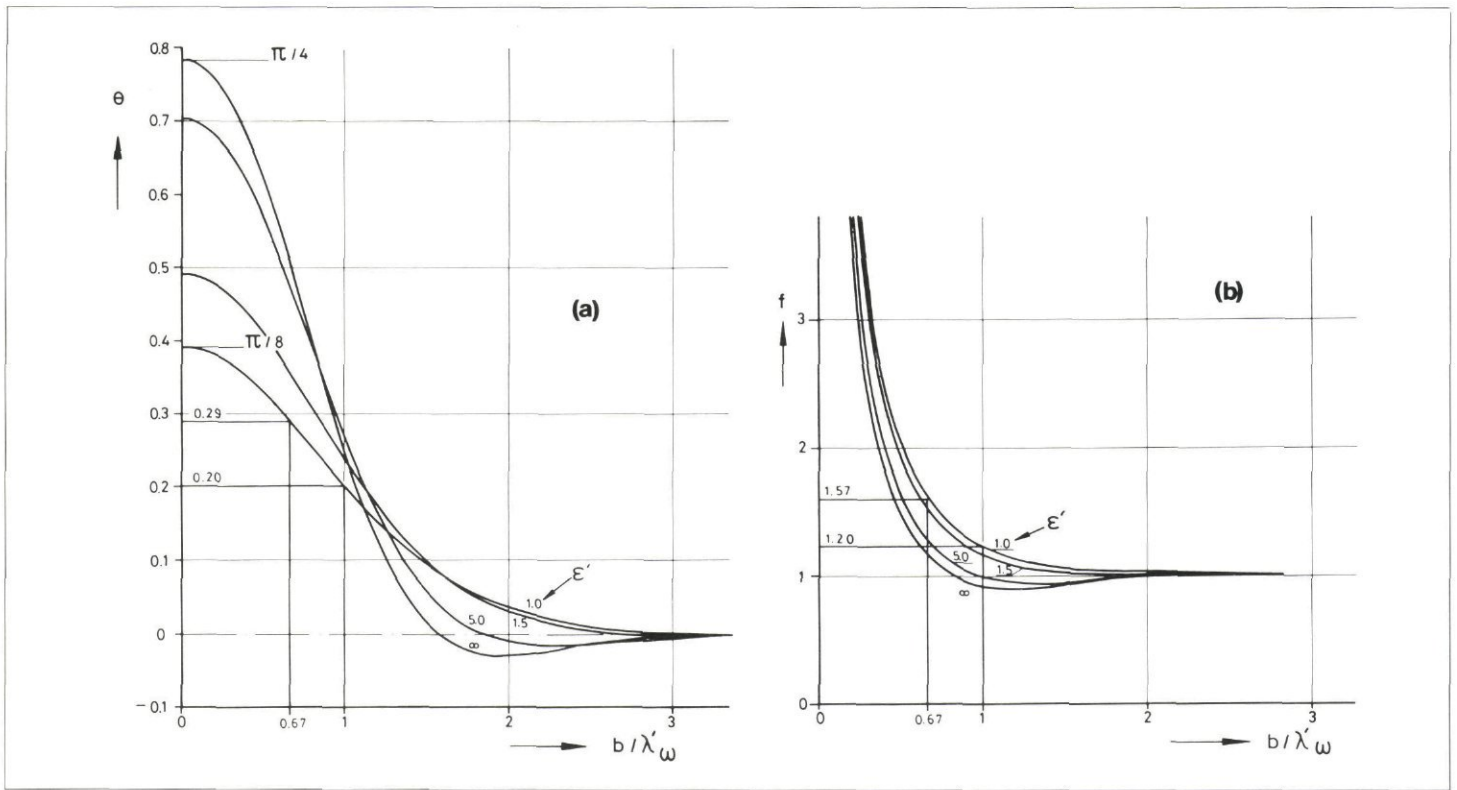
Uit deze grafieken blijkt dat voor $\epsilon \approx 1$ (stijf zand) geldt: $0 < \theta < \pi/8$ en $m > 1$, zodat geldt $\beta < 0$. Dit betekent dat er voorijling optreedt over het traject $0 < x < -2.4\beta\lambda_{\omega}$. Deze voorijling is beperkt, aangezien de respons wel de tendens van de belasting volgt.

Bovendien blijkt voor $b/\lambda_{\omega}' > 2$ dat $\beta \approx 0$ en $\rho = \ln(1 + \lambda_{\omega}'/\lambda_{\omega})$. Dit impliceert dat het voorland nauwelijks extra vertraging geeft, maar wel extra demping ter grootte van $1/(1 + \lambda_{\omega}'/\lambda_{\omega})$. Het rechtvaardigt de conclusie dat de geobserveerde demping van de amplitude de meest geschikte grootte is om een peilbuiswaarneming te analyseren.

Uit de grafieken in afb. 5 blijkt dat deze conclusie ook geldt voor situaties waarin de elastische berging in het zand een grotere rol speelt. Voor $b \rightarrow \infty$ vindt men de respons op getijdevariaties bij zeedijken.

Afb. 4 - Dijk met voor- en achterland.



Afb. 5 - Verband voor f en θ .

5. Bepaling van λ_{ω_0} en λ_{ω_0}'

De toepassing van de gepresenteerde formules kan geschieden in twee stappen:

- bepaling van de cyclische lekfactor λ_{ω_0} van het achterland;
- bepaling van de cyclische lekfactor λ_{ω_0}' van het voorland.

Voor de eerste stap kan een gemiddelde waarde voor λ_{ω_0} worden gevonden met formule (1) met behulp van de methode der kleinste kwadraten):

$$\lambda_{\omega_0} = \Sigma(\Delta_{ij})^2 / \Sigma(\Delta_{ij} |\ln \varphi_i / \varphi_j|)$$

Waarin Δ_{ij} de afstand is tussen peilbuis i en j en φ de desbetreffende amplitude. Voor de tweede stap wordt formule (2) gebruikt met behulp van een iteratieve methode. Meestal zijn een paar slagen voldoende om de juiste waarde van λ_{ω_0}' te bepalen.

In afb. 6 is een praktische toepassing uitgewerkt. Er zijn drie peilbuizen geplaatst in het achterland. Het is mogelijk om drie paar peilbuiswaarnemingen te correleren. Dit geeft voor de cyclische lekfactor voor het achterland:

$$\lambda_{\omega_0} = \frac{43^2 + 72^2 + 115^2}{43 \ln \left[\frac{3.2}{2.8} \right] + 72 \ln \left[\frac{2.8}{2.2} \right] + 115 \ln \left[\frac{3.2}{2.2} \right]}$$

$$= 306 \text{ m } (\pm 15 \text{ m})$$

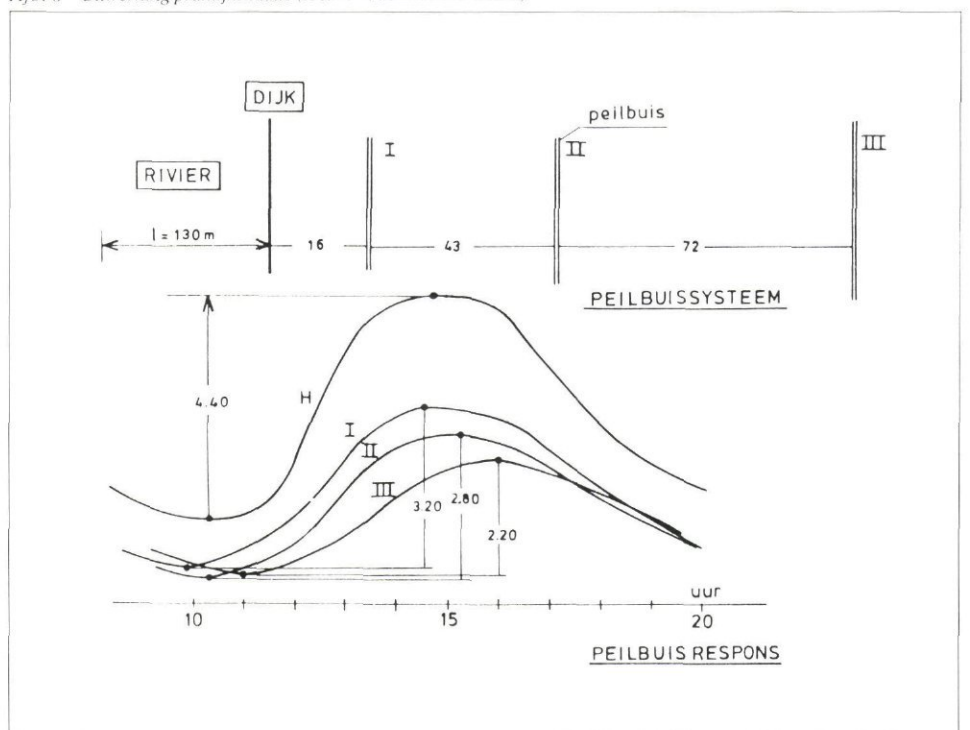
Vervolgens wordt een keus voor λ_{ω_0}' gedaan: 195m. Gebruik makend van de grafieken in

afb. 5 aannemend dat $\epsilon \approx 1$, volgt $\theta = 0.29$ en $f = 1.57$. Hiermee wordt $m = 1.000$ en tenslotte $\beta = -0.146$ en $\rho = 0.683$. De waarde van β geeft aan dat er voorijling optreedt tot $x = 108\text{m}$. De meting (afb. 6) geeft aan dat voorijling zich over een kleiner traject voordoet. De demping in peilbuis I ten

opzichte van de rivier wordt $\exp[-16/306 - 0.683] = 0.480$, echter de meting geeft 0.727. Dus λ_{ω_0}' is kleiner dan 195m. Een volgende keus voor λ_{ω_0}' is 130m.

In tabel I zijn de volgende iteratiestappen vermeld. Tenslotte blijkt de waarde λ_{ω_0}'

Afb. 6 - Uitwerking praktijksituatie (locatie in de Alblasserwaard).



TABEL I.

λ_{w0}	b/λ_{w0}	θ	f	m	β	ρ	ϕ_I/H	ϕ_{II}/H	ϕ_{III}/H
195	0.667	0.29	1.57	1.00	-.146	0.683	0.480		
130	1.000	0.20	1.20	0.51	-.068	0.408	0.631		
100	1.300	0.14	1.06	0.35	-.036	0.296	0.706		
90	1.444	0.114	1.05	0.31	-.027	0.268	0.726	0.631	0.499
meting →							0.727	0.636	0.500

= 90m goed te voldoen, ook voor de andere peilbuizen. Het traject waarover voorijling optreedt wordt 20m, hetgeen goed aansluit bij de metingen. De procedure is zeer geschikt voor toepassing op micro-computers. Resultaat van deze exercitie is dat voor dit profiel de respons voor getijde is gekarakteriseerd met de waarden $\lambda_{w0} = 306m$, $\beta = -.027rad$ en $\rho = 0.268$ voor het achterland. Beide laatste waarden hangen samen met de cyclische lekfactor van het voorland $\lambda_{w0}^* = 90m$. Voor andere typen randvoorwaarden, bijvoorbeeld een langdurig hoogwater, kunnen deze waarden niet worden toegepast. Hiervoor dient een andere analyse te worden uitgevoerd.

6. Concluesies

- De voorafgaande analyse resulteert in de volgende aanbevelingen:
- 1). Bij het evalueren van een getijde-respons dient de intreeweerstand in beschouwing te worden genomen om het verband met rivierstandswisselingen te kunnen beoordelen.
 - 2). Er zijn minstens twee peilbuizen per profiel nodig, beide geplaatst in het achterland op geschikte onderlinge afstand.
 - 3). De amplitude van een peilbuisrespons is de meest geschikte grootheid en deze is voldoende voor de bepaling van de maatgevende geohydrologische parameters.
 - 4). De consolidatie van de top laag in het Hollandse profiel is essentieel en niet de elastische berging van het watervoerend pakket.
 - 5). Het is van belang bij iedere peilbuiswaarneming te bekijken of deze relevant is voor de bepaling van λ_{w0} . Locale afwijkingen van de geschematiseerde geometrie of onjuist geplaatste peilbuizen geven in de respons een duidelijke aanwijzing. Als vertraging en/of damping niet overeenkomt met de verwachte tendens, dan dient de desbetreffende peilbuiswaarneming niet in de beschouwing te worden betrokken.
 - 6). Uit de voorijling is in principe een betere waarde voor ϵ te vinden (invloed van de elastische berging van het zandpakket), echter de kwaliteit van de metingen is veelal onvoldoende om een significante waarde voor ϵ vast te stellen. Het gaat meestal om een aanpassing van ϵ in de orde van procenten. Dit is meestal niet relevant.

Voor andere belasting-frequenties is gebruik te maken van de gevonden cyclische lekfactoren. Immers voor een gegeven situatie geldt:

$$\Omega = \lambda_{w0} \sqrt{\omega} = \text{constant en}$$
$$\Omega^* = \lambda_{w0}^* \sqrt{\omega} = \text{constant}$$

Dit betekent dat voor een andere belasting (ω_2) de relatieve damping volgens formule (1) gelijk is aan: $\exp[-x\sqrt{\omega_2/\Omega}]$. Voor formule (2) is iets dergelijks af te leiden. Ook superpositie is mogelijk, mits de gestelde aannamen blijven gelden: toplagen relatief dik en geen geometrische effecten (grenspotential). In principe kunnen formules worden afgeleid zonder deze beperkingen, maar die zijn ingewikkelder.

Literatuur

1. Barends, F. B. J., Calle, E. O. F. en Weijers, J. B. A. (1987). *A New Approach to Evaluate Pumping Test Data*. Int. Conf. ECSMFE, Dublin.
2. Barends, F. B. J., Brink, K. A. en Calle, E. O. F. (1983). *Interpretation of Field Measurement*. Int. Symp. MIIGS, Noordwijkerhout.
3. De Lange, W. F. en Maas, C. (1986). *Over het voorlopen van het grondwatergetij*. H₂O (19) nr. 2.
4. Barends, F. B. J. (1982). *Transient flow in leaky aquifers*. Int. Conf. Modern Approach to Groundwater Resources Management. Capri.



Inrichtingsplan Valkenburgse Meer vastgesteld: zandwinning, drinkwaterwinning en recreatie

Geen uitbreiding Leidse waterwinning in de duinen
De drinkwaterproduktie in de Leidse regio kan vier jaar eerder worden vergroot dan was voorzien. Gedeputeerde Staten van Zuid-Holland hebben namelijk in principe besloten de Leidsche Duinwater Maatschappij (LDM) toestemming te verlenen om

gebruik te maken van het water uit de zandwinplassen van het provinciale recreatiegebied-in-ontwikkeling Valkenburgse Meer bij het Zuidhollandse Valkenburg. Hierdoor is het niet nodig de waterwinning via oppervlakte-infiltratie in de duinen na 1988 nog verder uit te breiden. De onherstelbare schade, die daarmee aan de natuur in het duingebied tussen Wassenaar en Katwijk zou worden aangericht, kan nu worden voorkomen.

Inrichtingsplan

Bij het vaststellen van het inrichtingsplan voor het Valkenburgse Meer hebben Gedeputeerde Staten rekening gehouden met de belangen van zandwinning, waterwinning en recreatie. Het is de bedoeling dat de LDM vanaf 1989 water gaat betrekken uit de Kleine plas of 'Rijkswaterstaatsplas'. De kwaliteit van dit water is beter dan dat van het huidige inlaatpunt aan de Wassenaar-se Wetering. Tot 1 januari 1993 zal deze plas gescheiden blijven van de Grote plas, waar een kalkzandsteenfabriek zand wint. Als voorwaarde voor de inschakeling van het Valkenburgse Meer stellen Gedeputeerde Staten dat het diepinfiltratieproject van de LDM in 1989 operationeel moet zijn gemaakt; dat zal gebeuren in combinatie met de in 1988 te bouwen voorzuiveringsinstallatie in Katwijk. Aanvankelijk was de ontwikkeling van diepinfiltratie gekoppeld aan de aanleg van een tweede transportleiding voor voorgezuiverd water uit de Andelse Maas. Deze leiding tussen Bergambacht en het duingebied zou pas in 1993 zijn aangelegd. De recreatieve betekenis van de Kleine plas blijft tot 1993 beperkt. In 1988 zullen de voorzieningen voor landrecreatie in het zuidoostelijk deel wel worden ontwikkeld, maar de oevers van de Kleine plas blijven 'niet-recreatievriendelijk'. Llangs de noordrand van dat deel zal ongeveer 150 meter oever geschikt worden gemaakt voor surfers, zodat recreanten min of meer automatisch naar de Grote plas trekken. In 1993 zal de dam tussen de twee plassen worden verwijderd en kunnen de oevers van de Kleine plas worden ingericht voor recreatie. De continuïteit van de zandwinning kan worden gewaarborgd door een kleine uitbreiding van de grote zandwinplas aan de westzijde. Daar is vergunning van de provincie voor nodig. Het Valkenburgse Meer heeft een totale oppervlakte van 90 hectare: 25 hectare land en 65 hectare water. Op de plas is motorbootvaart niet toegestaan. De kosten voor recreatieve inrichting van het gebied en grondaankopen bedragen naar schatting vier miljoen gulden. Het ministerie van Landbouw en Visserij betaalt hiervan 75 % subsidie. (Persbericht Prov. Z-H)