

SUMMARY

Stability of sand slopes of storage canals and storage reservoirs in general

Unprotected sand slopes of storage canals and reservoirs, which are subjected to level variations, can be calculated with formula (15) mentioned in this paper. If the slopes are protected by an open construction formula (20) is valid.

The application of slopes protected by means of an open construction prevents the possibility of slope destruction in case of considerable fall of the level in the reservoir and opens perspectives to combine storage within the reservoir and extraction of the water percolating through the sandykes surrounding the reservoir.

Evenwicht van zandtaluds bij voorraadkanalen en bij spaarbekkens in het algemeen

Inleiding

In de duinwaterwinplaats van de Gemeentewaterleidingen Amsterdam wordt sinds 1853 het van de nuttige neerslag afkomstige bovenduinwater gewonnen door middel van een stelsel van open kanalen.

Dit grondwater bevindt zich boven een slecht doorlatende kleilaag, welke is gelegen op een diepte tussen 13 m - en 20 m - NAP.

Onder deze kleilaag bevindt zich een nog grotere zoetwatervoorraad, welke sinds 1903 wordt geëxploiteerd met gebruikmaking van putten die in het begin artesisch waren doch later moesten worden bemalen. De puttenrijen zijn daarbij gelegen langs de kanaaloevers en brengen het diepe duinwater in open kanalen.

Naarmate de vraag naar water steeg, is het aantal km kanaal eveneens toegenomen. Toen de optimaal mogelijke uitbreiding was bereikt, moest noodzakelijkerwijs tot verdieping van de kanalen worden overgegaan. Dit heeft in de loop der jaren geleid tot kanalen met be-

trekkelijk steile taluds, welke ook thans nog aanleiding geven tot evenwichtsverstoring onder en ter hoogte van de vaak wisselende waterspiegel.

Om een indruk te krijgen van de kanaaluitbreidingen in de duinwaterwinplaats zijn in afb. 1 de stadia van 1854, 1886, 1914 en 1935 weergegeven met resp. 3550, 18500, 25522 en 34310 m kanaallengte.

Tot 1957 hebben deze kanalen in hoofdzaak een tweetal functies verricht:

1. een wateronttrekkende functie aan het aangrenzende grondpakket;
 2. een watertransport-functie naar het centrale onttekkingspunt in de Oranjekom.
- Aan deze twee functies is sinds de infiltratie met voorgeïnciseerd rivierwater in 1957 een derde functie toegevoegd nl.
3. de mogelijkheid tot het vormen van voorraad in een gedeelte van de kanalen door verruiming van het profiel en toepassing van peilvariatie.

Afb. 1. - 1854.



Afb. 1. - 1886.



Daardoor is het thans mogelijk water van goede kwaliteit in voorraad te nemen om het in tijden van slechte kwaliteit te kunnen gebruiken voor bijmenging. Het zijn deze voorraadkanalen, welke in dit artikel aan een nadere beschouwing zullen worden onderworpen.

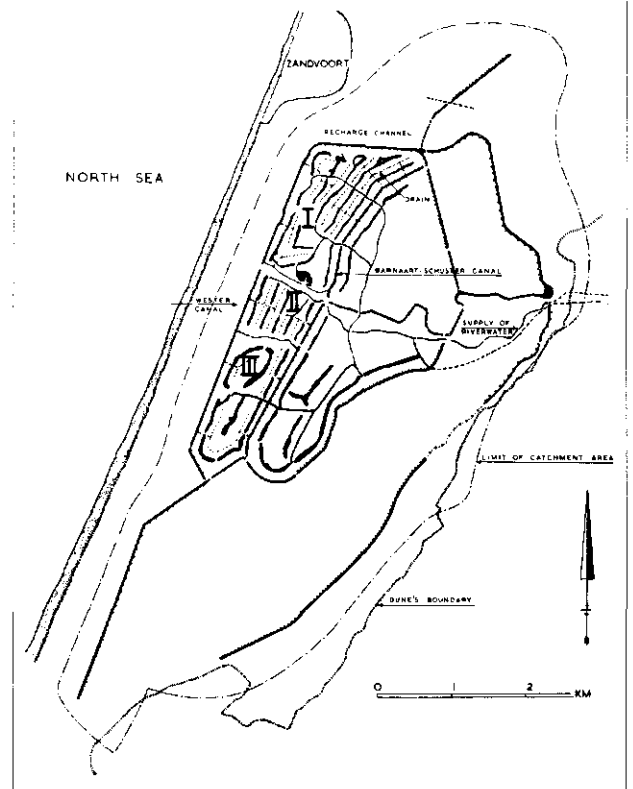
Voorraadkanalen

Van de thans in de duinwaterwinplaats aanwezige 37 km kanaallengte is in de periode van de totstandkoming van de infiltratiewerken een lengte van ruim 30 km in meerdere of mindere mate getransformeerd tot voorraadkanaal. Daartoe zijn de dwarsprofielen voor een belangrijk deel verruimd en is de mogelijke peilvariatie vergroot.

Afb. 2 geeft een indruk van het huidige kanalenstelsel en het gedeelte daarvan dat in belangrijke mate aan de voorraadvorming deelneemt.

Tabellarisch zijn de maximale peilvariaties *s* en de effectieve kanaallengten *L* als volgt te geven:

kanaal	max. peil	min. peil	s	L	L.s
Boogkanaal	1,00—	2,10—	1,1	1100	1210
Noordoostkanaal	0,50+	0,50—	1,0	4000	4000
Westerkanaal	0,50+	0,00	0,5	4600	2300
Barnaartkanaal	3,00+	2,30+	0,7	2000	1400
v. d. Vlietkanaal	5,00+	0,00	5,0	1500	7500
Zwarteveldkanaal-1	2,80+	1,20+	1,6	200	320
Zwarteveldkanaal-2	4,50+	1,80+	2,7	1200	3240
Sprenckkanaal-1	0,50+	0,50—	1,0	400	400
Sprenckkanaal-2	5,00+	0,00	5,0	1000	5000
Rechte Schusterkanaal-1	5,00+	0,00	5,0	1500	7500
Rechte Schusterkanaal-2	3,00+	2,30+	0,7	600	420
Nieuwkanaal	5,00+	0,00	5,0	2600	13000
Witteveldkanaal	5,00+	0,00	5,0	1300	6500
Kromme Schusterkanaal	5,00+	0,00	5,0	600	3000
v. Stirumkanaal-1	5,00+	0,00	5,0	600	3000
v. Stirumkanaal-2	1,00+	0,00	1,0	3500	3500
Oosterkanaal	1,00—	2,20—	1,2	4000	4800
samen					67090



Afb. 2.

De onttrekking van water uit de voorraadkanalen kan op verschillende manieren tot stand worden gebracht. Een tweetal methoden — ontleend aan de dissertatie van dr. ir. J. H. Edelman — zullen nader worden bezien:

1. Een constante onttrekking van Q_0 m³/etm., welke in formule is weer te geven met

$$Q_0 = \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\mu} kH \cdot \frac{L \cdot s}{\sqrt{t}}$$

Afb. 1. - 1914.



Afb. 1. - 1935.



2. Een linear toenemende onttrekking van nul tot Q_t m³/etm., welke resulteert in de formule

$$Q_t = \frac{3}{2} \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\mu} kH \cdot \frac{L \cdot s}{\sqrt{t}}$$

In deze formules is

- μ = het lucht-poriëngehalte (werkzame poriëngehalte)
- kH = de doorlatendheid van het zandpakket in m²/etm.
- L = de effectieve kanaallengte in m.
- s = de max. mogelijke peilverlaging in m.
- t = de tijd in etm. na het begin van de peilverlaging.

Met de voor het Amsterdamse duingebied gestelde waarden van $\mu = 0.30$ en $kH = 115$ m²/etm. volgt dan

$$Q_0 = 10 \cdot \frac{L \cdot s}{\sqrt{t}} \quad \text{en} \quad Q_t = 15 \cdot \frac{L \cdot s}{\sqrt{t}}$$

Met de in de voorgaande tabel aangegeven afgeronde waarde van

$$\Sigma L \cdot s = 60.000 \text{ m}^2$$

is thans in de duinwaterwinplaats realiseerbaar een onttrekking, welke volgt uit de formules:

$$\Sigma Q_0 = \frac{600.000}{\sqrt{t}} \quad \text{en} \quad \Sigma Q_t = \frac{900.000}{\sqrt{t}} \text{ m}^3/\text{etm.}$$

Lineaire peildaling en evenwicht van de zandtaluds

In het voorgaande hoofdstuk is stilzwijgend verondersteld, dat gedurende elk tijdsverloop t de daarbij behorende waarden van Q_0 en Q_t ook inderdaad zijn te bereiken. In dit hoofdstuk zal blijken, dat de waarden Q_0 en Q_t worden begrensd door de toelaatbare peildaling per etm. in de voorraadkanalen.

Deze toelaatbare peildaling per etm. hangt nauw samen met de stabiliteit van het gekozen talud van de voorraadkanalen.

Uitgaande van een linear met de tijd toenemende peilverlaging in een voorraadkanaal zijn volgens de dissertatie van dr. ir. J. H. Edelman de volgende formules van toepassing (zie afb. 3): per m¹ geldt

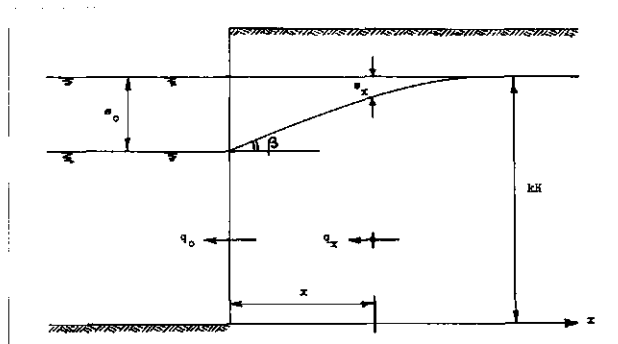
$$s_0 = \alpha \cdot t \quad (1) \quad s_x = s_0 \cdot F_4(u) \quad (2)$$

$$q_0 = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\mu} kH \cdot \sqrt{t} \quad (3) \quad q_x = q_0 \cdot F_3(u) \quad (4)$$

waarin $F_3(u)$ en $F_4(u)$ functies zijn van de parameter

$$u = \frac{\mu}{2\sqrt{\mu} kH} \cdot \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

Afb. 3.



met daarin

- kH = de doorlatendheid van het zandpakket in m²/etm.
- α = de peildaling per etm.
- μ = het lucht-poriëngehalte.

Uit (1) volgt $t = \frac{s_0}{\alpha}$ Dit in (5) geeft

$$u = \frac{\mu \sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\mu} kH} \cdot \frac{x}{\sqrt{s_0}} \quad \text{m.a.w.} \quad \frac{du}{dx} = \frac{\mu \sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\mu} kH \cdot \sqrt{s_0}} \quad (6)$$

Ons interesseert de waarde van $\text{tg } \beta$, welke is te bepalen met de formule:

$$\text{tg } \beta = \left[\frac{d(s_0 - s_x)}{dx} \right]_{x=0} = - \left[\frac{ds_x}{dx} \right]_{x=0} \quad (7)$$

Met formule (2) volgt dan

$$\frac{ds_x}{dx} = s_0 \cdot \frac{dF_4(u)}{dx} = s_0 \cdot \frac{dF_4(u)}{du} \cdot \frac{du}{dx} \quad (8)$$

Volgens onze notatie en die van dr. Edelman is

$$F_4(u) = -f_2(u)$$

Met blz. 12 van de dissertatie is $f_1(u) = \frac{df_2(u)}{d(2u)}$ m.a.w.

in formule (8) is

$$\frac{dF_4(u)}{du} = \frac{-2df_2(u)}{2d(u)} = -2 \frac{df_2(u)}{d(2u)} = -2 f_1(u)$$

onze notatie
notatie Edelman

Aangezien ons interesseert de waarde voor $x = 0$ dus $u = 0$ volgt:

$$\left[\frac{dF_4(u)}{du} \right]_{u=0} = -2 \left[f_1(u) \right]_{u=0} = -2,2568 \quad (9)$$

(diss. Edelman blz. 77)

Met de formules (6), (7) en (8) alsmede de waarde van (9) is dan:

$$\text{tg } \beta = -s_0 \cdot -2,2568 \cdot \frac{\mu \cdot \sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\mu} kH \cdot \sqrt{s_0}} = 1,1284 \cdot \frac{\mu \sqrt{\alpha} s_0}{\sqrt{\mu} kH} \quad (10)$$

Om een indruk te krijgen van de daling van het freatisch vlak in het talud door daling van het kanaalpeil, is in afb. 4 een peildaling aangenomen van 1 m/etm. ($\alpha = 1$) tot een max. peilverlaging s_0 van 5 m. Daarbij zijn steeds bepaald de waarden van q_0 en s_x .

Thans zal worden onderzocht hoe het evenwicht van zanddeeltjes mogelijk is in een talud met een hellingshoek ψ en een waterverhang in het talud met een hellingshoek β (zie afb. 5).

Daarbij is verondersteld, dat evenwichtsverstoring van het onderwatertalud door stromingskrachten (micro-evenwicht) eerder optreedt dan evenwichtsverstoring door het zich vormen van glijdvlakken (macro-evenwicht). In ons

duingebied is steeds deze micro-evenwichtsverstoring waargenomen onder handhaving van het macro-evenwicht.

Onder invloed van de zwaartekracht en de opwaartse waterdruk wordt per volume-eenheid op een zanddeeltje van het onderwatertalud uitgeoefend een verticale kracht

$$\gamma_{ng} - \gamma_w \text{ waarin } \gamma_{ng} = \gamma_{dr} + \mu_t \cdot \gamma_w \quad (11)$$

Hierin is

- γ_{ng} = het volumegewicht van natte grond
- γ_w = het volumegewicht van water en
- μ_t = het totale poriëngehalte

Onder invloed van het waterverhang $i = \text{tg } \beta$ wordt ter plaatse van de taludlijn per volume-eenheid een stromingsdruk uitgeoefend van $\gamma_w \cdot i$.

Normaal is deze stromingsdruk werkzaam in de richting van de stroomlijnen nabij het talud. Daar het onder-

watertalud tevens equipotentiaalvlak is, zou de stromingsdruk dus gericht moeten zijn loodrecht op dit onderwatertalud. Bij een stationaire stroming en een homogeen zandpakket zal dit ook inderdaad het geval zijn.

Waar het hier echter een niet-stationaire stroming betreft door een veelal horizontaal gelaagd zandpakket — zowel in de natuur als bij opgespoten dijkslichamen is deze horizontale gelaagdheid aanwezig en is de horizontale doorlatendheid meestal een veelvoud van de verticale doorlatendheid — is aangenomen, dat de stroomlijnen nabij het onderwatertalud horizontaal blijven en de stromingsdruk dus ook horizontaal is.

De normaalkracht loodrecht op het talud wordt dan

$$N = (\gamma_{ng} - \gamma_w) \cdot \cos \psi - \gamma_w \cdot i \cdot \sin \psi \quad (12)$$

Onder invloed van deze normaalkracht en verwaarlozing van de cohesie ontstaat langs het talud een wrijvingskracht ter grootte van $f \cdot N$, waarin $f = \text{tg } \varphi$ en $\varphi =$ de hoek van het natuurlijk talud.

De evenwichtsvoorwaarde langs het talud is dan, na invoering van een veiligheidscoëfficiënt tegen verstoring van het evenwicht = $A (< 1)$:

$$(\gamma_{ng} - \gamma_w) \cdot \sin \psi + \gamma_w \cdot i \cdot \cos \psi = A \cdot f \left[(\gamma_{ng} - \gamma_w) \cos \psi - \gamma_w \cdot i \cdot \sin \psi \right] \quad (13)$$

of na uitwerking

$$i = \text{tg } \beta = \left(\frac{\gamma_{dr}}{\gamma_w} + \mu_t - 1 \right) \cdot \frac{A \text{ tg } \varphi - \text{tg } \psi}{1 + A \text{ tg } \varphi \text{ tg } \psi} \quad (14)$$

Door gelijkstelling van de formules (10) en (14) volgt

$$i' \alpha = \left(\frac{\gamma_{dr}}{\gamma_w} + \mu_t - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{\mu} k H}{1,1284 \mu \sqrt{s_0}} \cdot \frac{A \text{ tg } \varphi - \text{tg } \psi}{1 + A \text{ tg } \varphi \text{ tg } \psi} \quad (15)$$

Uit formule (15) volgt voor $A = 1$ (dus zonder veiligheidscoëfficiënt) direct een plausibel gegeven:

indien een talud wordt aangelegd met een hellingshoek $\psi = \varphi$ (hoek van het natuurlijk talud), dan is een peilverlaging niet mogelijk zonder dat het onbeschermd talud wordt verstoord (cohesie = 0).

Elke waarde van ψ die kleiner is dan de hoek van het natuurlijk talud laat wel een daling van het kanaalpeil toe, welke zich direct uit formule (15) laat afleiden (voor $A = 1$). Uit deze formule blijkt tevens, dat er een minimum grens is gesteld aan de waarde van A bij een bepaalde hoek van het natuurlijk talud en een gegeven hoek ψ van een talud.

Deze grenswaarde is

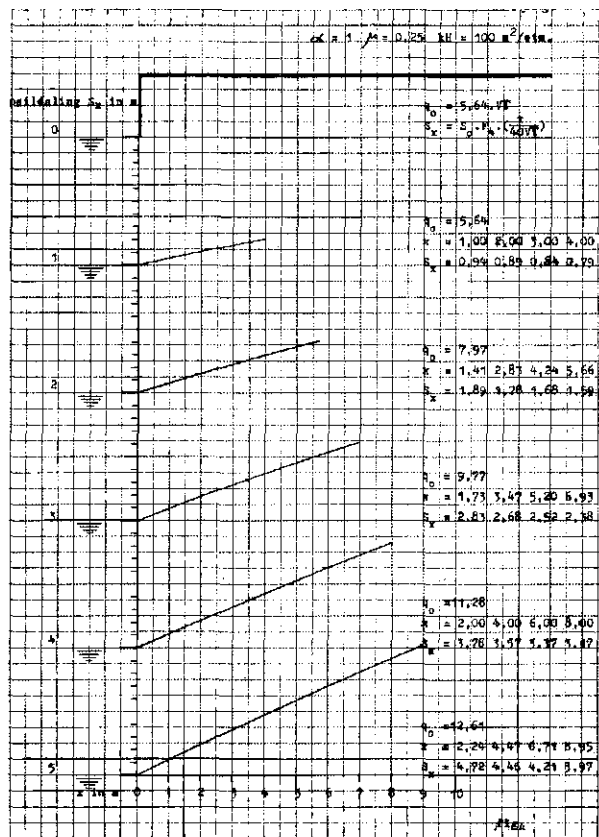
$$A_{\text{min.}} = \frac{\text{tg } \psi}{\text{tg } \varphi} \text{ en maakt de waarde van } \alpha = 0$$

dus geen peildaling mogelijk.

Voor een talud 1 : 3 en een $\varphi = 30^\circ$ is

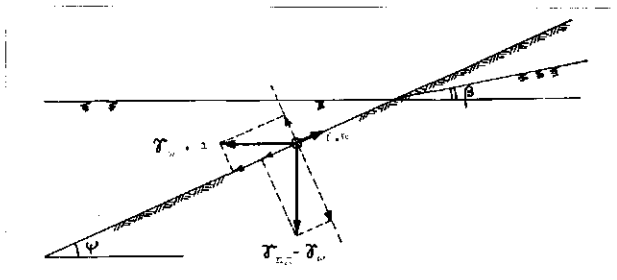
$$A_{\text{min.}} = \frac{1/3}{1/3 \sqrt{3}} = 0,577 \text{ dus } \frac{1}{A_{\text{min.}}} = 1,73 \text{ m.a.w.}$$

een talud 1 : 3 laat slechts een 1,73-voudige veiligheid toe op evenwichtsverstoring voor een $\varphi = 30^\circ$.



Afb. 4.

Afb. 5.



Een talud 1:4 is uiteraard veel veiliger en geeft op dezelfde wijze $A_{min.} = 0,433$ en een 2,31-voudige veiligheid.

Het is theoretisch onmogelijk te bepalen, welke veiligheid tegen evenwichtsverstoring noodzakelijk is. Deze verstoring kan mede ontstaan door wind of golfslag tegen het talud, doch ook het belasten van het talud nabij de waterspiegel heeft invloed.

Aan de hand van een rekenvoorbeeld, gebaseerd op het duingebied, zal de waarde van α worden bepaald als functie van de waarde van A:

$$\gamma_{dr} = 1,65 \text{ t/m}^3 \quad \mu_t = 0,35 \quad \gamma_w = 1 \text{ t/m}^3 \quad \mu = 0,25$$

$$kH = 100 \text{ m}^2/\text{etm.} \quad s_0 = 5 \text{ m.} \quad \varphi = 30^\circ \quad \text{tg } \psi = 1/3$$

Met formule (15) is dan na invulling en uitwerking:

$$\alpha = 62,8295 \left[\frac{A \sqrt{3} - 1}{1/3 A \sqrt{3} + 3} \right]^2 \quad (\text{zie afb. 6})$$

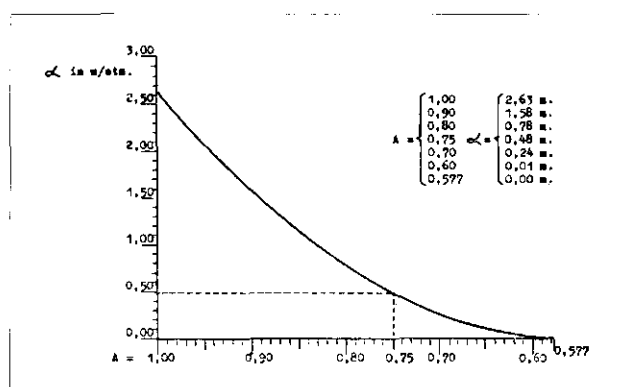
Arbitrair wordt aangenomen een A-waarde van minstens 0,75, overeenkomende met een toelaatbare peildaling van $\alpha = 0,5 \text{ m/etm.}$

Uitgaande van deze peildaling per etm. van het kanaal zal in de thans volgende berekening worden bepaald, hoeveel water per m^1 vrijkomt uit het kanaalprofiel zelf en uit het aangrenzende grondpakket (2-zijdig).

Uit formule (3) volgt voor de hoeveelheid water welke in de tijd t uit 2 taluds toevloeit naar het kanaal:

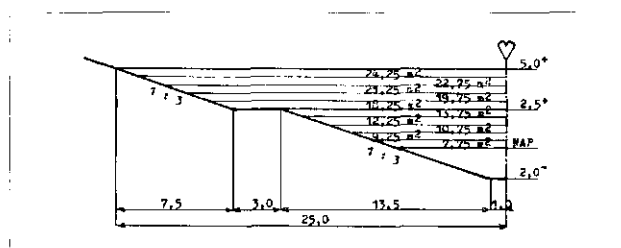
$$Q_t = 2 \cdot \int_0^t q_0 dt = \frac{4\alpha}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\mu} kH \cdot \int_0^t \sqrt{t} dt \quad (16)$$

Na uitwerking blijkt $Q_t = \frac{8\alpha}{3\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\mu} kH \cdot t \sqrt{t} \quad (17)$



Afb. 6.

Afb. 7.



In het getallenvoorbeeld met $\alpha = 0,5 \text{ m/etm.}$ $\mu = 0,25$ en $kH = 100 \text{ m}^2/\text{etm.}$ is dan

$$Q_t = 3,7613 \cdot t \sqrt{t} \quad (18)$$

$Q_{0-1} = 3,76 \text{ m}^3$	$Q_{0-1} = 3,76 \text{ m}^3$
$Q_{0-2} = 10,64 \text{ m}^3$	$Q_{1-2} = 6,88 \text{ m}^3$
$Q_{0-3} = 19,54 \text{ m}^3$	$Q_{2-3} = 8,90 \text{ m}^3$
$Q_{0-4} = 30,09 \text{ m}^3$	$Q_{3-4} = 10,55 \text{ m}^3$
$Q_{0-5} = 42,05 \text{ m}^3$	$Q_{4-5} = 11,96 \text{ m}^3$
$Q_{0-6} = 55,28 \text{ m}^3$	$Q_{5-6} = 13,23 \text{ m}^3$
$Q_{0-7} = 69,66 \text{ m}^3$	$Q_{6-7} = 14,38 \text{ m}^3$
$Q_{0-8} = 85,11 \text{ m}^3$	$Q_{7-8} = 15,45 \text{ m}^3$
$Q_{0-9} = 101,56 \text{ m}^3$	$Q_{8-9} = 16,45 \text{ m}^3$
$Q_{0-10} = 118,94 \text{ m}^3$	$Q_{9-10} = 17,38 \text{ m}^3$

Deze berekening is uiteraard ook direct uit te voeren met gebruikmaking van vergelijking (3), waaruit dan volgt:

$$2 q_0 = 5,642 \sqrt{t} \quad (\text{tweezijdig})$$

Na 10 etm. is de maximum peildaling van 5 m bereikt. Om de uitstroming uit de taluds daarna nog te bepalen, is uitgegaan van het superpositiebeginsel door te stellen: de uitstroming na 11 etm. (dus 5,5 m peildaling) wordt verminderd met de instroming na 1 etm. (dus 0,5 m peilrijzing). Daardoor blijft het peil op de max. waarde van 5 m.

In de algemene formule is dan voor t 10 etm.:

$$Q_t = 3,7613 \left[t \sqrt{t} - (t-10) \cdot \sqrt{t-10} \right] \quad (19)$$

$Q_{0-11} = 137,22 - 3,76 = 133,46 \text{ m}^3$	dus $Q_{10-11} = 14,52 \text{ m}^3$
$Q_{0-12} = 156,35 - 10,64 = 145,71 \text{ m}^3$	$Q_{11-12} = 12,25 \text{ m}^3$
$Q_{0-13} = 176,30 - 19,54 = 156,76 \text{ m}^3$	$Q_{12-13} = 11,05 \text{ m}^3$
$Q_{0-14} = 197,03 - 30,09 = 166,94 \text{ m}^3$	$Q_{13-14} = 10,18 \text{ m}^3$
$Q_{0-15} = 218,51 - 42,05 = 176,46 \text{ m}^3$	$Q_{14-15} = 9,52 \text{ m}^3$
	enz. enz.

Bij peildaling in een kanaal komt niet alleen water vrij uit het zandpakket aan weerszijden, doch eveneens direct uit het kanaalprofiel zelf. In afb. 7 is een gestileerd dwarsprofiel van het v. d. Vlietkanaal in de Amsterdamse duinen weergegeven. Per 0,5 m peildaling is daarin de kanaalinhoud per m^1 aangegeven.

Uit sommatie van deze waarden en de vrijkomende hoeveelheden van de formules (18) en (19) ontstaat afb. 8, welke de totale hoeveelheid water per etm. weergeeft bij 5 m peildaling.

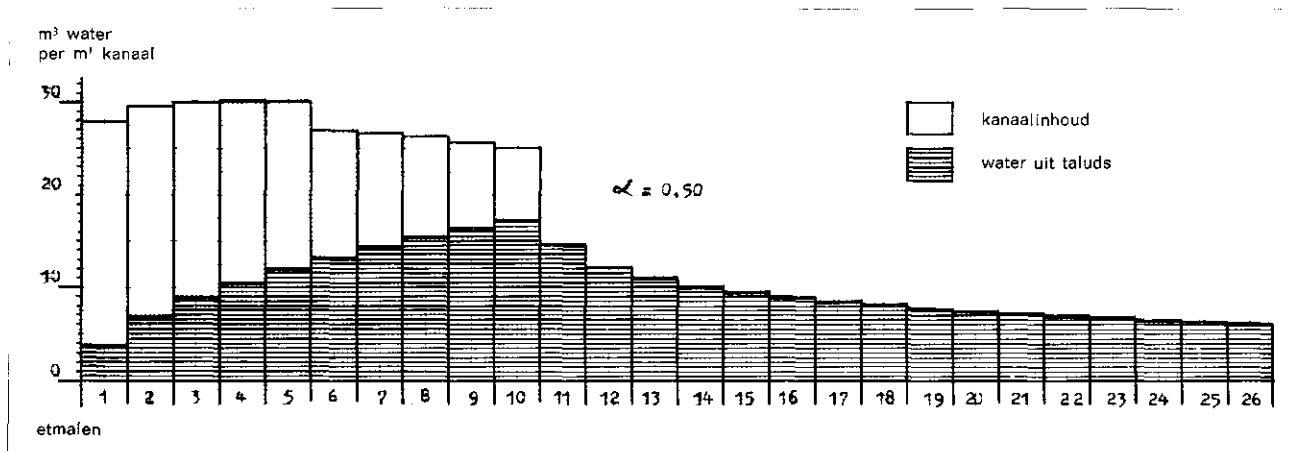
Op dezelfde wijze is in afb. 9 het resultaat gegeven van een peildaling van 0,25 m/etm.

Met een uit de praktijk stammende waarde van $5 \text{ m}^3/\text{m}^1$ kanaaloever/etm. als toelaatbare onttrekking aan het zandpakket ziet het er naar uit, dat bij de gekozen taluds 1:3 in het duingebied een peildaling van 0,25 m/etm. als het meest wenselijk moet worden gekwalificeerd.

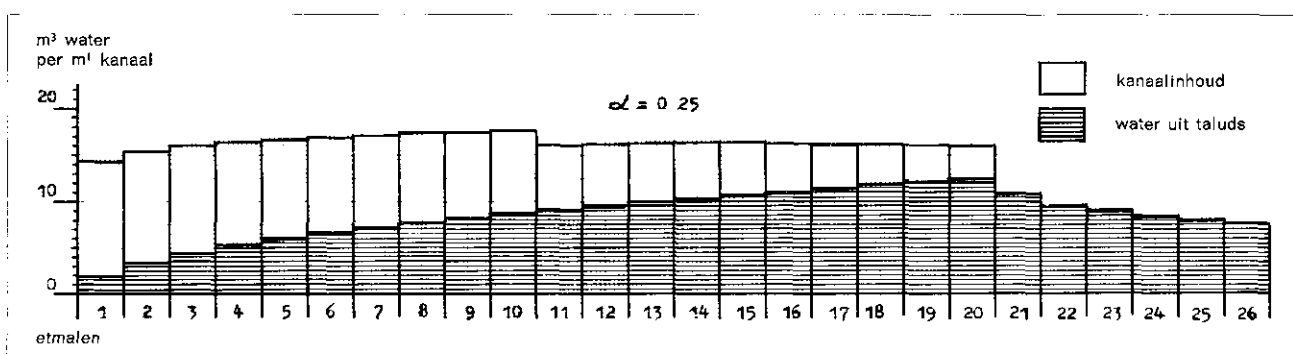
Evenwicht van taluds bij spaarbekkens

Bij de aanleg van voorraadbekkens in het algemeen doet zich in feite eenzelfde probleem voor als bij de voorraankanalen in het Amsterdamse duingebied. Ook daar zullen de taluds behalve aan weersinvloeden worden blootgesteld aan de wisselende waterstanden in het bekken.

Om de indringing van water uit het spaarbekken in de taluds zoveel mogelijk te beperken, worden de taluds



Afb. 8.



Afb. 9.

veelal bekleed met waterdichte constructies. Alle goede voorzorgen ten spijt gelukt het echter nooit de taluds droog te houden en zullen er in het omringende grondlichaam waterstanden optreden, welke in beperkte mate op en neer gaan met de waterspiegel in het spaarbekken. Met name bij sterke peildalingen in het bekken bestaat het reële gevaar, dat de nog hoge waterstanden in het grondlichaam de „waterdichte” bekleding van het talud afdrukken met alle gevolgen van dien.

Om dit afdrukken van de talusbekleding te verhinderen zijn soms zeer ingrijpende technische voorzieningen noodzakelijk, welke de waterstanden in het grondlichaam moeten reguleren.

In dit verband is de vraag gerechtvaardigd of het wel juist is om uit te gaan van een waterdichte bekleding van de spaarbekken-taluds.

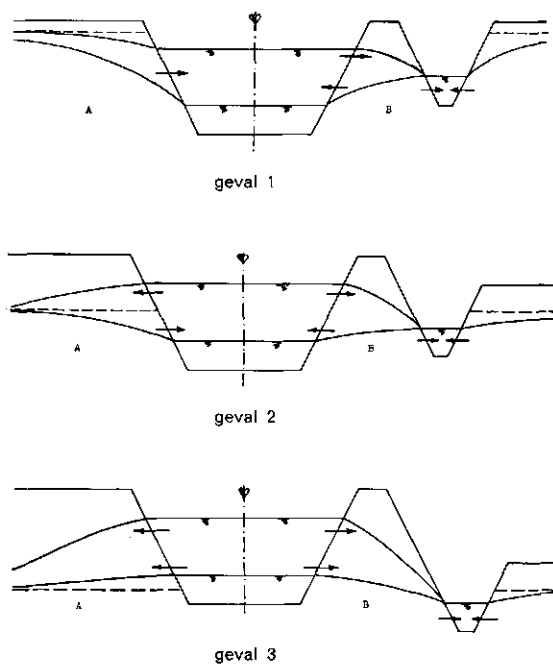
Bij een niet waterdichte bekleding van de taluds bestaat nl. de mogelijkheid van kwelwinst of kwelverlies naar of vanuit het spaarbekken, waarbij de taluds als zodanig niet in gevaar worden gebracht door het mee rijzen of dalen van de waterspiegel in het omringende grondpakket.

Uiteraard moet wel bekend zijn of de kwelwinst naar het spaarbekken water oplevert van een aanvaardbare kwaliteit, terwijl bij kwelverliezen uit het spaarbekken de kwantiteit daarvan binnen redelijke grenzen moet blijven. Overigens moeten de mogelijke kwelverliezen uit het spaarbekken niet te somber worden gezien. Waarom zou het niet denkbaar zijn een spaarbekken te bezien als een apparaat, dat niet alleen voorraadbekken is doch daar-

naast binnen zekere grenzen kwelverliezen vertoont, welke verliezen als geïnfilterd oppervlaktewater in de productie van drinkwater worden opgenomen. Daartoe moet rondom het spaarbekken een winningskanaal worden aangelegd, waarin het kwelwater wordt opgevangen. Er kan dus bewust gestreefd worden naar een combinatie van voorraadvorming en waterwinning door gebruikmaking van de beperkte doorlatendheid van het veelal technisch noodzakelijke grondlichaam rondom het spaarbekken. Zelfs is het in beperkte gevallen denkbaar het spaarbekken bovendien te benutten om onder de in het spaarbekken aanwezige druk voorraadwater in de diepere ondergrond te brengen, om het op een later tijdstip weer terug te winnen. Met name doen deze gevallen zich voor wanneer zich onder het spaarbekken een weerstandbiedende kleilaag bevindt en het daaronder aanwezige watervoerende zandpakket voor dieptebevoorrading in aanmerking komt.

Afhankelijk van plaatselijke omstandigheden kan bij de aanleg van spaarbekkens onderscheid worden gemaakt in een drietal gevallen:

1. de grondwaterspiegel buiten het spaarbekken is gelijk of hoger dan de maximum waterstand in het bekken;
2. de grondwaterspiegel buiten het bekken bevindt zich tussen het maximum- en minimum peil in het spaarbekken;
3. de grondwaterspiegel buiten het spaarbekken is gelijk of lager dan de minimum waterstand in het bekken.



Afb. 10.

In afb. 10 staan deze drie gevallen schematisch weergegeven.

De A-oplossingen zijn daarbij meer van toepassing in zandgrondgebieden, terwijl de B-oplossingen zich meer lenen voor spaarbekkens in het polderland. De waterstand in het omringende winningskanaal kan, met name in het geval 1-B, dichter zijn gelegen bij de oorspronkelijke grondwaterstand.

De taluds van het spaarbekken worden in sommige gevallen onderworpen aan naar binnen gerichte stromingskrachten, terwijl in de andere gevallen deze stroming naar buiten is gericht. Hetzelfde kan worden vermeld van de taluds van het winningskanaal rondom het spaarbekken. In geval 3 van afb. 10 zullen de taluds van het spaarbekken slechts worden onderworpen aan stromingskrachten, welke naar buiten zijn gericht.

Evenwichtsverstoringen zullen daar niet optreden. In de gevallen 1 en 2 echter doen zich omstandigheden voor, waarbij evenwichtsverstoring wel degelijk kan optreden. De reeds eerder in dit artikel genoemde formule (15) zal dan uitkomst kunnen brengen bij het bepalen van de helling van het onbeschermd talud.

Taludbescherming

In vele gevallen zullen de taluds van spaarbekkens in verband met golfaanval van een bekleding moeten worden voorzien, tenzij een natuurlijke begroeiing met riet of biezen tot de mogelijkheden behoort. Door de wisselende waterstanden van een spaarbekken zijn de kansen echter klein en zal deze natuurlijke begroeiing meer geschikt zijn voor doorstroombekkens met geringe peilvariaties.

Het aanbrengen van een open taludbekleding biedt daarbij de mogelijkheid om de taluds steiler te maken, aangezien de zanddeeltjes van het talud een extra verticaal-kraft ondervinden van het onderwatergewicht van de bekleding.

Met verwijzing naar afb. 11 wordt de formule (15) van

het onbeschermd talud thans voorzien van een extra term, waardoor de formule van het beklede talud luidt:

$$\sqrt{\alpha} = \left(\frac{p}{\gamma_w} + \frac{\gamma_{dr}}{\gamma_w} + \mu_t - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{\mu} kH}{1,1284 \mu \sqrt{s_o}} \cdot \frac{A \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \psi}{1 + A \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi} \quad (20)$$

waarin $p = \frac{d \cdot \gamma_{s_o} + b \cdot \gamma_{g_o}}{\cos \psi}$ (willekeurig voorbeeld)

en γ_{s_o} en γ_{g_o} de s.g. onder water van de steenzetting en de grindlaag met dikten van resp. d en b .

Als rekenvoorbeeld en ter vergelijking van het onbektele en het beklede talud is uitgegaan van de volgende waarden:

$\alpha = 1 \text{ m/etm.}$ $\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3$ $\gamma_{dr} = 1,65 \text{ t/m}^3$ $\mu_t = 0,35$
 $\mu = 0,25$ $kH = 100 \text{ m}^2/\text{etm.}$ $s_o = 5 \text{ m.}$ $A = 0,75$
 $\varphi = 30^\circ$ $d = b = 0,2 \text{ m.}$ $\gamma_{s_o} = 1,65 \text{ t/m}^3$ en
 $\gamma_{g_o} = 1,0 \text{ t/m}^3$

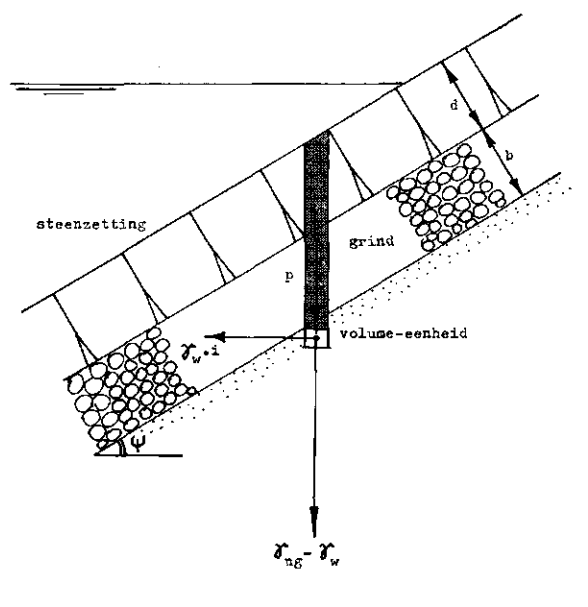
Met gebruikmaking van formule (15) is $\operatorname{tg} \psi = 0,29097$ hetgeen neerkomt op een helling van het onbektele talud van 1 : 3,44.

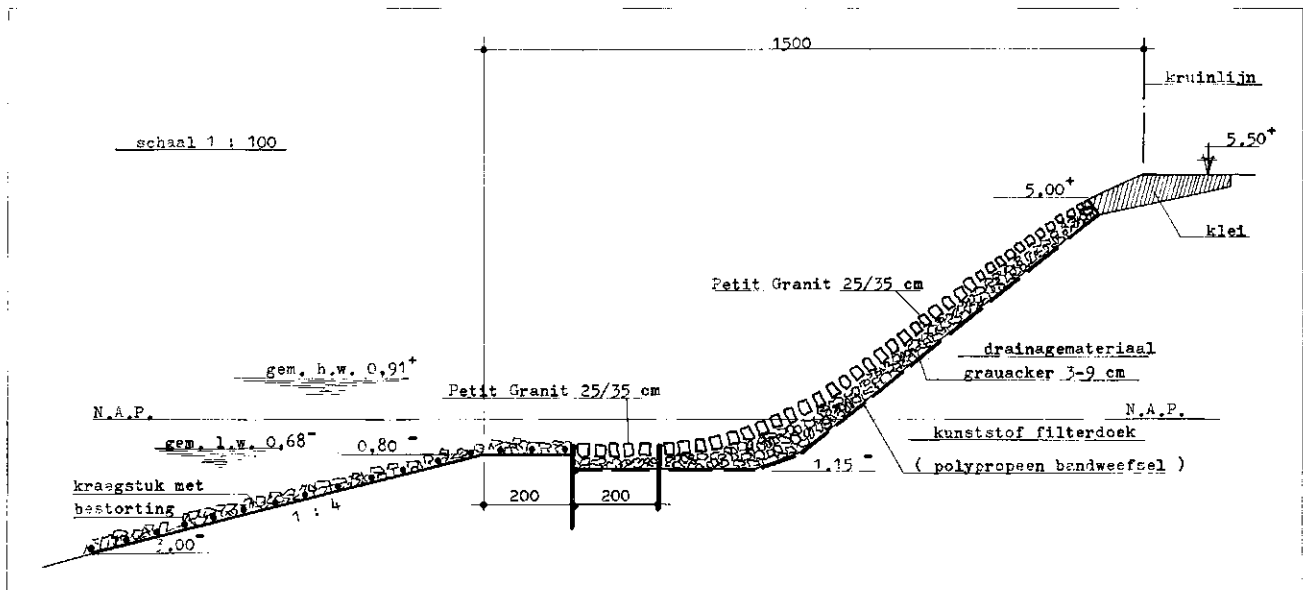
Met gebruikmaking van formule (20) is $\operatorname{tg} \psi = 0,34024$ hetgeen neerkomt op een helling van het beklede talud van 1 : 2,94.

Open constructie van het beklede talud

Het construeren van een open taludbescherming zal in de meeste gevallen een nog niet zo eenvoudige opgave zijn. Enerzijds moet er voor worden gewaakt dat het zand van het grondlichaam bij uittrede van het grondwater wordt tegengehouden door een met zorg gekozen materiaal, terwijl anderzijds de constructie bestand moet zijn tegen de aanval van golfslag, kruierend ijs en andere natuurinvloeden.

Afb. 11.





Afb. 12. - Oeververdediging havenbekkens Rotterdamse Maasvlakte.

Bij de aanleg van de oeververdedigingen voor de havenbekkens in de Rotterdamse Maasvlakte is naar mijn mening een zeer aantrekkelijke constructie ontwikkeld, welke beantwoordt aan de in dit artikel vermelde doelstellingen. Daar wordt nl. een doorlatend nylonweefsel met rietbedekking op het zandtalud aangebracht en afgedekt met een laag gebroken grind, waarop een steenzetting. De maaswijdte van het nylonweefsel moet uiteraard worden afgestemd op de korrelgrootte van het zandlichaam en voldoende doorlatend zijn (zie afb. 12).

Slotconclusie

Onbeschermde zandtaluds van voorraadkanalen of spaarbekkens, welke aan peilvariaties blootstaan, kunnen worden berekend met de in dit artikel vermelde formule (15).

Zijn de taluds voorzien van een open oeverbekleding dan is deze constructie te berekenen met de formule (20).

Het toepassen van niet gesloten oeverbekledingen voorkomt de mogelijkheid van taludverstoring bij aanzienlijke peildalingen in het spaarbekken en opent perspectieven tot het combineren van voorraadvorming binnen het spaarbekken en waterwinning van het door het grondlichaam rond het bekken kwellende infiltratiewater.

Literatuur

- Edelman, J. H., *Dissertatie Delft 1947.*
Dictaat Grondmechanica, TH Delft.
 Keveling Buisman, A. S., *Grondmechanica.*