COW.
t.a.v. ir. Zijlmans
hooftskade 1
2526 KA Den Haag

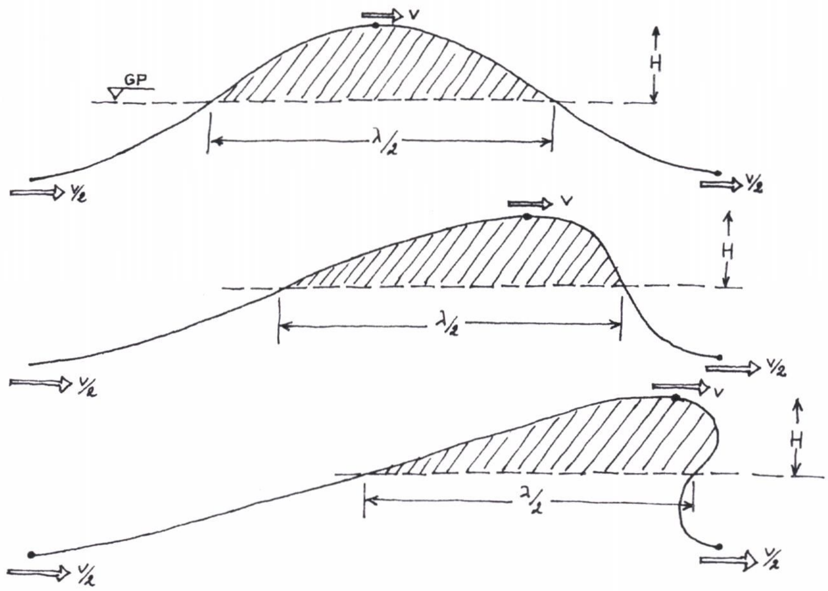
Een dijk in de branding.

Een dijk beschermt het achterland tegen het water en moet bestand zijn tegen de golfaanval.
Waar de golven de dijk treffen zijn extra versterkingen aangebracht, maar ook elders in het dijklichaam kan de dynamische belasting een verstorende werking hebben.
Aan de lijzijde worden compressiegolven teruggekaatst en deze kunnen aanleiding geven tot terugschrijdende erosie. Het achtertalud kalft af en de stabiliteit vermindert.

LGVI F.B.J. Barends
mei 1972

De golf.

Uit een vereenvoudiging van de golfbeweging op het moment, dat deze wil breken, is een maat voor de kracht van de golf stoot te berekenen.
Door de wind, de stroming, het wateroppervlak en de waterdiepte is een golvenspectrum bekend. De karakteristieke golf uit dit spectrum heeft een amplitude H en een loopsnelheid v. Nadert de golf een dijk, dan is ondiepte de oorzaak , dat de golf breekt; de waterdeeltjes in de top blijven hun snelheid behouden, terwijl dieper de snelheid wordt geremd. De golf haalt zichzelf in. Hij breekt. Op dat moment is een botsing met de dijk het hevigst. Als de snelheid in het golfdal bijvoorbeeld de helft is van die in de top, is de vorm van de golf afhankelijk van de tijd.



Als nu het gearceerde deel van de golf in rekening wordt gebracht als de massa van het botsende water en als de gemiddelde snelheid $v/2$ bedraagt, waarmee het water de dijk treft, dan is de stootkracht eenvoudig te bepalen. De massa per breedte bedraagt $\rho \frac{H\lambda}{\pi}$
Stel, dat de klap een constante stootkracht heeft gedurende de tijd, die nodig is voor de compressiegolf om zich door het stotende lichaam te verplaatsen. Met andere woorden: het laatste deeltje water heeft zijn bijdrage in de stoot op het dijkoppervlak geleverd. Deze tijd is $\frac{\sqrt{H\lambda}}{2c}$, als λ de golflengte is en c de voortplantingssnelheid van compressiegolven in water.

Tenslotte is een benadering voor de stootkracht van de golf

$$Q = \rho \frac{\sqrt{H\lambda}}{\pi} v c$$

Voorbeeld:

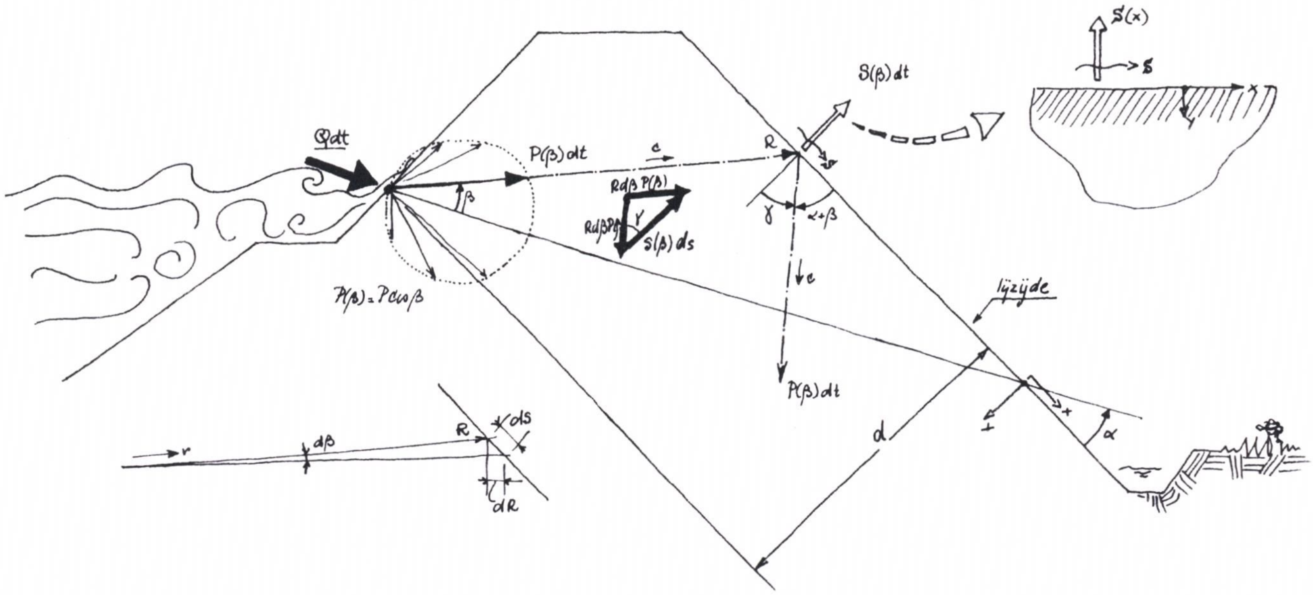
Na een storm is de karakteristieke golf bepaald met:

de loopsnelheid	:	$v = 10$ m/sec
de voortpl.snelheid	:	$c = 1500$ m/sec
de amplitude	:	3 m
de soortelijke massa per breedte	:	1 kg/m² /m'
de golflengte	:	70 m.

waaruit volgt voor de stootkracht: $Q =$ 75.000 kgf/m'

De dijk

De puls spreidt zich door het dijklichaam. De intensiteit is richting-gevoelig: $P(\beta) = P\cos\beta$



Aan de lijzijde moet steeds worden voldaan aan de randvoorwaarde, namelijk , dat de spanningen daar gelijk nul zijn. Dientengevolge onstaat er een lopende puls. Alleen compressiegolven in het dijk-massief bekeken en deze planten zich voort met snelheid c.
De lopende puls langs de lijzijde heeft een snelheid van

$$B = \frac{ds}{dR}\,c = \frac{c}{\cos(\alpha+\beta)}$$

welke altijd groter is dan c : een superseismische snelheid.
De intensiteit van de oppervlakte puls $S(\beta)$ hangt samen met de intensiteit $P(\beta)$ in het belastingpunt. De totale intensiteit blijft dezelfde: er gaat geen energie verloren, zodat geldt:

$$Q = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} P(\beta)\,r\,d\beta = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} r\cos(\beta)\,P\,d\beta = 2Pr$$

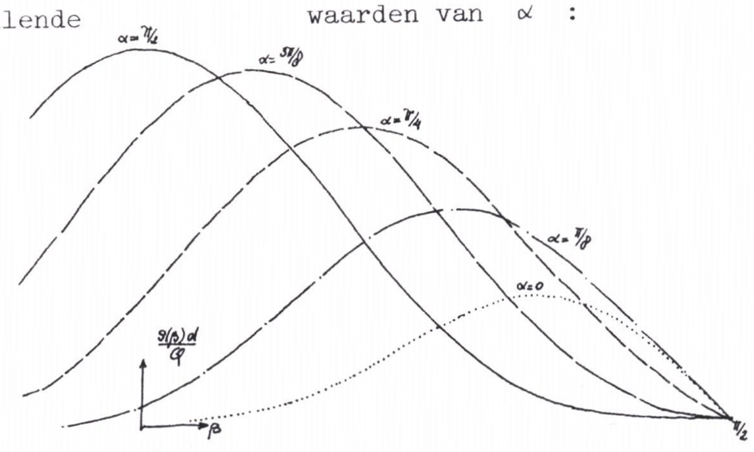
ofwel

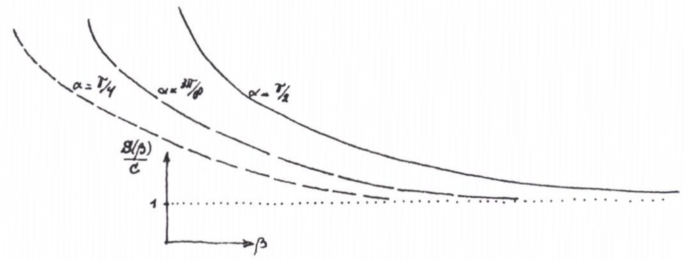
$$P(\beta) = \frac{Q}{2r}\cos(\beta)$$

Voor de oppervlakte puls volgt dan:

$$S(\beta) = 2\frac{R\,d\beta}{ds}\,P(\beta)\cos\gamma = \frac{Q}{R}\cos(\beta)\sin^2(\alpha+\beta) = \frac{Q}{d}\cos(\beta)\sin^2(\alpha+\beta).$$

Het snelheidsprofiel en de pulskracht uitgezet tegen β voor verschillende waarden van α :



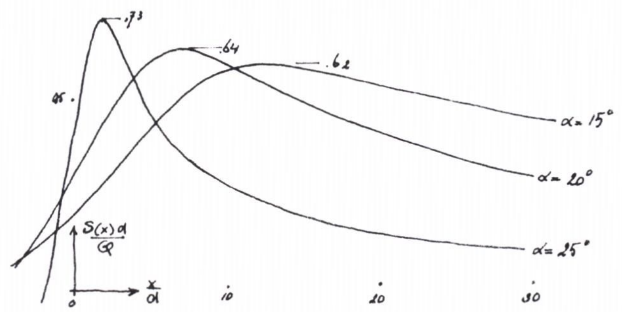


De relatie met de coördinaat x is

$$S(x) = \frac{Q}{d} \cos \operatorname{arctg}\left[\frac{x\,tg\alpha}{x + d(tg\alpha + cotg\alpha)}\right] . \left(\sin\left\{\alpha + \operatorname{arctg}\left[\frac{x\,tg\alpha}{x + d(tg\alpha + cotg\alpha)}\right]\right\}\right)^3$$

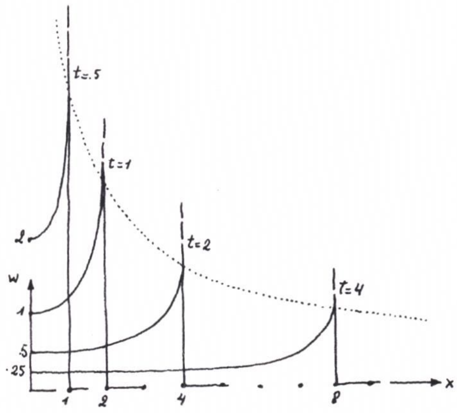
$$s(x) = c\left\{\cos\left\{\alpha + \operatorname{arctg}\left[\frac{x\,tg\alpha}{x + d(tg\alpha + cotg\alpha)}\right]\right\}\right\}^{-1}$$

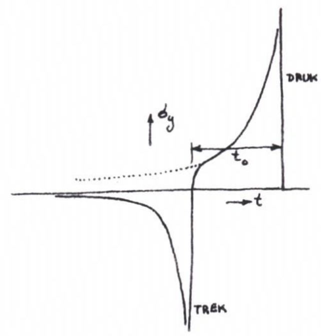
en uitgezet voor verschillende waarden van α



De snelheid loopt af langs de lijzijde uitgaande van het projectiepunt van het belastingspunt op de lijzijde. In het gebied van de dijk is die snelheid groter dan de voortplantingssnelheid. Het golvenfront, dat ontstaat door de puls $S(\beta)$ ijlt in de dijk na.

Door het golvenfront ontstaan spanningen in het dijklichaam. Een elastische, zijhet een vereenvoudigde benadering wordt toegepast om iets omtrent de stabiliteit van het achtertalud te voorspellen.





Bij verwaarlozing van de horizontale verplaatsingen (langs het talud) is voor de zakking te schrijven:

$$w(x,y,t) = \frac{S(\beta)\,dt}{\pi\sqrt{\rho(\lambda+2\mu)}}\left[\frac{\mu}{\rho}t^2 - \frac{\mu}{\lambda+2\mu}y^2 + x^2\right]^{-1/2}\mathcal{H}\left(t-\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}y^2+\frac{\rho}{\mu}x^2}\right)$$

$$\mathcal{H}(t-\tau) = \{(0 \wedge t<\tau) \vee (1 \wedge t>\tau)\}$$ μ, λ : Lamé-konstanten. ρ: soortelijke massa grond.

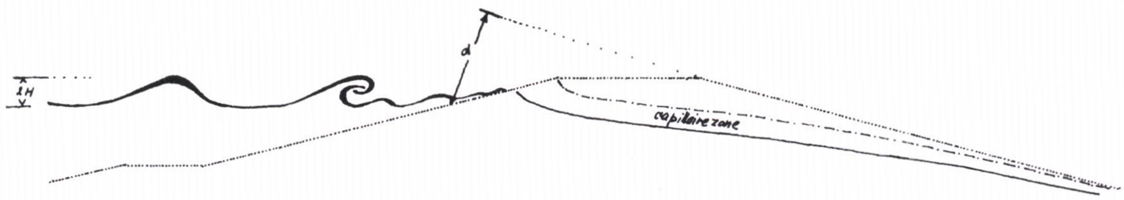
De normaalspanning kan dan worden benaderd met

$$\sigma_y(x,y,t) = (\lambda+2\mu)\frac{\partial w}{\partial y} = -(\lambda+2\mu)\frac{1}{\vartheta^2}\frac{\partial\vartheta}{\partial y}\Bigg|_{\vartheta=\sqrt{\frac{\mu}{\rho}t^2-\frac{\mu}{\lambda+2\mu}y^2-x^2}}$$

$$= \mu\frac{\delta(\beta)\,dt}{\pi\sqrt{\rho(\lambda+2\mu)}}\;y\left[\frac{\mu}{\rho}t^2-\frac{\mu}{\lambda+2\mu}y^2-x^2\right]^{-3/2}\mathcal{H}\left(t-\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}y^2+\frac{\rho}{\mu}x^2}\right)$$

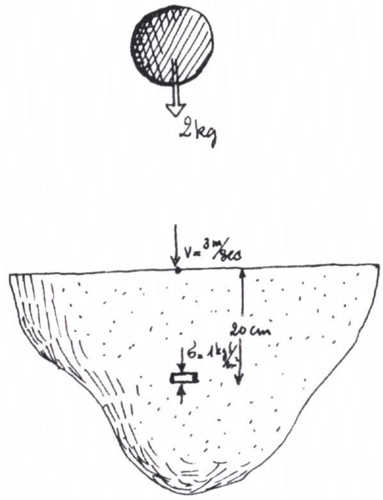
De spanning neemt in de diepte af volgens y^{-2} . Deze trage uitdemping hangt samen met het model. De zijdelingse spreiding zal minder bijdragen als door de formule wordt gesuggereerd. De ondergrond wordt in feite beschouwd als een compressief medium, waarin de compressiegolven zich voortplanten volgens de richting van de puls. Zijdelingse overdracht vindt trager plaats en deze spreiding geeft de uitdemping.
In de buurt van het achtertalud ontstaat achtereenvolgens een drukspanning ten gevolge van de puls en een trekspanning ten gevolge van de teruggekaatste golf. Deze spanningen zijn in grootte-orde ongeveer gelijk en treden na elkaar op met een tijdsverschil, $t_o = y/c$, waarin de golf loopt naar de rand en terug naar het observatiepunt.

De spanningen worden als de dijk van water verzadigd is hoofdzakelijk door het water opgenomen. Nu wordt een dijk zorgvuldig gebouwd en er wordt voldoende tijd uitgetrokken voor het zetten van het dijklichaam. Er is een goede korrelstruktuur. Daar, waar de dijk verzadigd is - het massief, waar het grondwater en het capillaire water zich bevindt - , zal het in de poriën aanwezige water de samenhang doen bewaren. Het water is moeilijk samendrukbaaar, zodat de golven zich snel door het massief voortplanten. De weerstand, die het water ondervindt tegen stromen, is groot. Er zal dientengevolge in de korte tijd dat het golvenfront passeert geen stroming plaats vinden.



Aan de lijzijde van de dijk bevindt zich de grens van de capillaire zone dieper in het dijklichaam. De struktuur verandert daar. Op het scheidingsvlak kunnen er slecht trekspanningen worden overgedragen. Dynamische trekspanningen kunnen alleen worden opgenomen als de stationaire spanning veroorzaakt door het eigen gewicht toereikend is om deze te compenseren. Zoniet dan is het evenwicht verstoord en kan de struktuur worden aangetast. De korrels verliezen hun samenhang en bewegen langs het talud naar beneden. Een grasmat met een goede wortelstruktuur kan deze erosie aanzienlijk beperken.

voorbeeld



Uit een eenvoudige proef in droog dichtgepakt zand, bleek, dat er op een diepte van 20 cm een pulsspanning passeerde van ongeveer 1 kgf/cm² ten gevolge van een klap veroorzaakt door een vallend gewicht van 2 kg van een hoogte van 50 cm. De tref-snelheid bedraagt dan 3 m/sec.

Bevindt de capillaire zone zich op een diepte van 20 cm onder het talud, waar de maximale puls optreedt voor $\alpha = 25°$, dan heerst daar een statische spanning van $0{,}035$ kgf/cm². De golf treft de dijk met een loopsnelheid van 10 m/sec ; de te verwachten pulsspanning ten gevolge van een klap door een valgewicht van 0,02 kg van een hoogte van 5 m is $0{,}036$ kgf/cm², welke waarde overeen komt met de statische spanning. Is de karakteristieke breedte d van de dijk 10 m. , dan dient de werkelijke golfklap op het belastingpunt te bedragen: $\varphi = 10 * 0{,}75^{-1} * 0{,}02 = 1333$ kgf/m'
De sterkte van de klap , zoals die in een storm te verwachten is kan een waarde bezitten, die een orde tien groter is, blijkens de voorgaande sumiere berekening.
Herhaalde zware golfstoten op een dijklichaam kan de erosie aan de lijzijde bevorderen.

F.B.J.Barends
mei 1972