

Beschouwing van een aantal bereke-
ningsmethoden voor het dimensioneren
van gesloten dijkbekledingen op
wateroverdruk
S-83.003

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
ing. J.T. de Vries
Maart 1983.

Voorwoord

Dit rapport is op 24 juni 1983 besproken in werkgroep 4.

Vastgesteld is dat het zinvol is dat de verschillenden rekenmethoden in dit rapport zijn samengevat.

De in de tekst gebezigde term "nederlandse methode" zou ten onrechte kunnen suggeren dat de bekledingen in het verleden te licht zijn gedimensioneerd.

De bekledingen in Nederland zijn voor zover bekend alleen met behulp van het electrisch analogon van de Deltadienst gedimensioneerd. Deze methode leidt niet tot de in dit rapport geconstateerde afwijkingen tussen de resultaten met behulp van de methode volgens rapport '61 en die met behulp van de Duitse methode en/of de methode Van der Veer. Besloten is dat dit rapport alleen voor intern gebruik binnen de TAW is bestemd.

1. Inleiding: doel van het overzicht

Door een hogere waterstand in een dijklichaam met gesloten bekleding dan de buitenwaterstand kunnen overdrukken onder de bekleding ontstaan. Om schade te voorkomen moet deze bekleding daarop gedimensioneerd worden.

De hoge waterstand onder de bekleding kan veroorzaakt worden door o.a. het getij (springtij, stormvloed), een hoogwatergolf op een rivier en kwelwater.

Doel van dit rapport is een aantal gangbare berekeningsmethoden met elkaar te vergelijken en de verschillen en/of beperkingen ervan aan te geven in een rekenvoorbeeld.

Algemeen wordt in de berekeningsmethoden gebruik gemaakt van een evenwichtsbeschouwing van de bekleding, die waarschijnlijk voor het eerst gepubliceerd is in het "Voorlopig rapport '61" van de werkgroep "Gesloten dijkbekledingen" [lit. 1]. Vanuit deze evenwichtsbeschouwing worden formules voor een zogeheten "schuifcriterium" (een criterium voor de bekleding waaraan deze bij regelmatig voorkomende overdrukken moet voldoen) en een "drijfcriterium" (een criterium voor de bekleding waaraan deze bij overdrukken die maximaal 1 à 2 keer per jaar voorkomen moet voldoen) afgeleid. Deze criteria worden in hoofdstuk 2 toegelicht.

De methoden die met elkaar zullen worden vergeleken zijn:

- Methode "Voorlopig rapport '61" [lit. 1.]
- Methode "Deltadienst" [lit. 2, 3]
- "Duitse methode" [lit. 4, 5]

Voor het uiteindelijke bepalen van de benodigde bekledingsdikte moeten in de formules voor het schuif- en drijfcriterium waarden voor een maximaal optredende grondwateroverdruk onder de bekleding gesubstitueerd worden.

De waarde voor deze grondwateroverdruk is sterk afhankelijk van de methode waarmee deze bepaald wordt.

Om dit aan te tonen zijn in vergelijkende berekeningen een drietal "vuistregels" met elkaar vergeleken, namelijk de "Nederlandse driehoeksregel" [lit. 1, 7], de "Duitse driehoeksregel" [lit. 4, 5] en de methode volgens v.d. Veer [lit. 6].

<u>Inhoud</u>	<u>Blz.</u>
1. Inleiding: doel van het overzicht.	1
2. Algemene evenwichtsbeschouwing van de bekleding.	2
2.1. Formules uit Voorlopig rapport '61.	2
2.1.1. Afleiding van het schuifcriterium	4
2.1.2. Afleiding van het drijfcriterium	4
2.2. Formules van de Deltadienst.	5
2.3. Duitse formules	6
2.4. Samenvatting	7
3. Bepaling van de maximale overdruk.	8
3.1. Methode Voorlopig rapport '61.	8
3.2. Methode Deltadienst.	8
3.3. Duitse methode.	10
3.4. Methode volgens van der Veer.	11
3.5. Samenvatting	12
4. Vergelijking van de methoden.	13
4.1. Rekenvoorbeeld.	13
4.2. Conclusies uit de vergelijkende berekeningen.	14
5. Conclusies.	18
6. Literatuur.	19

Bijlagen

1. Tabel 1 : resultaten rekenvoorbeeld.
2. Grafiek 1 : $\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het afschuifcriterium.
3. Grafiek 2 : $\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het drijfcriterium.
4. Grafiek 3 : $\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het afschuifcriterium.
5. Grafiek 4 : $\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het drijfcriterium.

2. Algemene evenwichtsbeschouwing van de bekleding

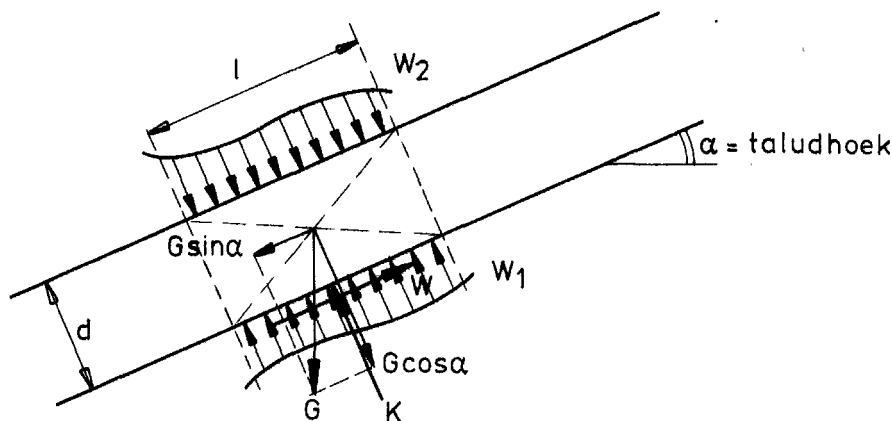
2.1. Formules uit Voorlopig rapport '61

Indien de waterspanningen bekend zijn, kunnen de op de bekleding werkende krachten hieruit worden afgeleid. Voor asfaltproducten is het verband tussen spanningen en vervormingen nog niet voldoende bekend om op basis hiervan de vereiste dikte voor een bekleding te bepalen. Daarom wordt in afwachting van betere rekenmethoden geen rekening gehouden met dwarskrachten en normaalkrachten, om gesloten bitumineuze bekledingen op overdrukken te kunnen dimensioneren.

Beschouw een denkbeeldig blokje met lengte l , dikte d en een breedte van 1 lengte-eenheid uit de bekleding.

Het blokje kan geen momenten noch dwarskrachten op de naastliggende bekleding overbrengen.

Op het blokje werken de volgende krachten (zie figuur 1):



Figuur 1: evenwichtsbeschouwing van krachten

W_1 = waterdruk onder tegen het blokje $[\text{kN/m}^2]$

W_2 = waterdruk boven tegen het blokje $[\text{kN/m}^2]$

G = eigen gewicht van het blokje = $d \cdot l \cdot \gamma_b$ $[\text{kN}]$

K = korrelkracht onder tegen het blokje $[\text{kN}]$

W = wrijvingskracht tussen ondergrond en het blokje $[\text{kN}]$

$W = K \tan \phi_v$ waarbij ϕ_v de wrijvingshoek tussen de bekleding en ondergrond is; indien ϕ (= hoek van inwendige wrijving van de ondergrond) $< \phi_v$ dan moet aangehouden worden $W = K \tan \phi$.

Evenwicht evenwijdig aan de bekleding eist:

$$G \sin \alpha = K \tan \phi_v$$

Evenwicht loodrecht op de bekleding eist:

$$G \cos \alpha = W_1 \cdot l - W_2 \cdot l + K$$

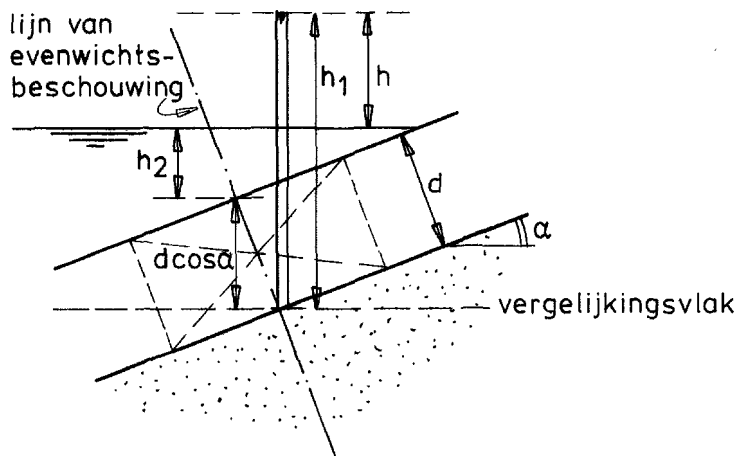
Eliminatie van K geeft:

$$(W_1 - W_2) \cdot l = G \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi_v} \right) \cdot \cos \alpha \quad (1a)$$

Indien γ_b het soortelijk gewicht van het bekledingsmateriaal is dan wordt $G = \gamma_b \cdot l \cdot d$. Is γ_w het soortelijk gewicht van water dan is

de resulterende waterdruk uit te drukken in termen van potentiaalverschil t.o.v. een vergelijkingsvlak (zie figuur 2):

$$\begin{aligned} W_1 \cdot l &= h_1 \cdot \gamma_w \cdot l \\ W_2 \cdot l &= h_2 \cdot \gamma_w \cdot l \\ h &= h_1 - (h_2 + d \cos \alpha) \\ (W_1 - W_2) \cdot l &= (h + d \cos \alpha) \cdot \gamma_w \cdot l \end{aligned} \quad (1b)$$



Figuur 2: potentiaalverschil onder en boven de bekleding.

Combinatie van de formules 1a en 1b geeft een verband tussen het aanwezige potentiaalverschil h van het water onder en boven de bekleding en de benodigde dikte d van de bekleding op die plaats, afhankelijk van de parameters γ_b , γ_w , α en ϕ_v .

De formule is een betrekking voor evenwicht evenwijdig aan de bekledingsrichting.

$$(h + d \cos \alpha) \cdot \gamma_{\omega} \cdot l = \gamma_b \cdot d \cdot l \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi_v}\right) \cdot \cos \alpha$$

$$h = d \cdot \left\{ \gamma_b \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi_v}\right) - \gamma_{\omega} \right\} \frac{\cos \alpha}{\gamma_{\omega}} = d \cdot \left\{ \frac{\gamma_b - \gamma_{\omega}}{\gamma_{\omega}} - \frac{\gamma_b}{\gamma_{\omega}} \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \phi_v} \right\} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Vervolgens is hieruit op eenvoudige wijze het "schuifcriterium" af te leiden.

2.1.1. Afleiding van het schuifcriterium

Voor het schuifcriterium moet gelden dat er nog net evenwicht bestaat tussen de op het blokje werkende krachten uit figuur 1, dus er dient voldaan te worden aan formule (2). Bij dit evenwicht neemt het potentiaalverschil h zover toe, dat het "blokje" nog net niet evenwijdig aan de bekledingsrichting gaat schuiven (de component $G \sin \alpha$ maakt net evenwicht met W).

Om hieraan te voldoen volgt rechtstreeks uit (2):

$$d \geq \frac{h}{\cos \alpha} \cdot \left\{ \frac{(\gamma_b - \gamma_{\omega}) \cdot \tan \phi_v - \gamma_b \cdot \tan \alpha}{\gamma_{\omega} \cdot \tan \phi_v} \right\}^{-1} \quad \text{of:}$$

$$d \geq \frac{h}{\cos \alpha} \left\{ \frac{\gamma_{\omega} \cdot \tan \phi_v}{(\gamma_b - \gamma_{\omega}) \cdot \tan \phi_v - \gamma_b \tan \alpha} \right\} \quad (3)$$

2.1.2. Afleiding van het drijfcriterium

Voor het drijfcriterium moet gelden dat er maximaal nog net evenwicht bestaat tussen de krachten die loodrecht op de bekledingsrichting op het blokje werken. Er hoeft dan niet algemeen evenwicht te zijn volgens formule (2).

Bij dit evenwicht neemt het potentiaalverschil zover toe, dat het blokje nog net niet opdrijft.

Evenwicht vereist dan (figuur 1):

$$G \cos \alpha - K \geq (W_1 - W_2) \cdot l$$

Op het moment van opdrijven is de korrelkracht $K = 0$, zodat de formule voor het drijfcriterium wordt:

$$\gamma_b \cdot l \cdot d \cos \alpha \geq (h + b \cos \alpha) \cdot \gamma_{\omega} \cdot l$$

$$\gamma_b \cdot d \cos \alpha - \gamma_{\omega} \cdot d \cos \alpha \geq h \cdot \gamma_{\omega}$$

$$d \geq \frac{\gamma_{\omega}}{(\gamma_b - \gamma_{\omega}) \cdot \cos \alpha} \cdot h \quad (4)$$

2.2. Formules van de Deltadienst

Door de Deltadienst worden voor het dimensioneren van gesloten bekledingen de twee criteria aangehouden zoals genoemd in 2.1.1. en 2.1.2. [lit. 2, 3]. Uit een identieke algemene evenwichtsbeschouwing volgen de volgende formules voor het schuif- en drijf criterium.

$$\text{Schuifcriterium: } P \leq d \cdot \gamma_b \cdot \cos \alpha \frac{\tan \phi_v - \tan \alpha}{\tan \phi_v}$$

$$\text{Drijfcriterium : } P \leq d \cdot \gamma_b \cdot \cos \alpha$$

Hierin is P de resultante van de druk aan onder- en bovenzijde van de bekleding ($P = (W_1 - W_2) \cdot l$), waarvoor in termen van potentiaalverschil t.o.v. een referentievlaak geldt: $P = (h + d \cos \alpha) \cdot \gamma_\omega$ (zie figuur 2). Dit ingevuld geeft:

$$\text{Schuifcriterium: } h \leq d \cos \alpha \left\{ \frac{\gamma_b}{\gamma_\omega} \cdot \frac{\tan \phi - \tan \alpha}{\tan \phi} - 1 \right\} \quad (5)$$

$$\text{Drijfcriterium : } h \leq d \cos \alpha \left\{ \frac{\gamma_b}{\gamma_\omega} - 1 \right\} \quad (6)$$

De formules (5) en (6) zijn om te werken tot de formules (3) en (4) uit Voorlopig rapport '61 op de volgende manier:

Uit (5) volgt:

$$h \leq d \cos \alpha \left\{ \frac{\gamma_b \cdot \tan \phi_v - \gamma_b \cdot \tan \alpha - \gamma_\omega \cdot \tan \phi_v}{\gamma_\omega \cdot \tan \phi_v} \right\}$$

$$h \leq d \cos \alpha \left\{ \frac{\gamma_b - \gamma_\omega}{\gamma_\omega} - \frac{\gamma_b}{\gamma_\omega} \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \phi_v} \right\}$$

$$d \geq \frac{h}{\cos \alpha} \left\{ \frac{\gamma_\omega \cdot \tan \phi_v}{(\gamma_b - \gamma_\omega) \cdot \tan \phi_v - \gamma_b \cdot \tan \alpha} \right\} \quad \text{is gelijk aan (3)}$$

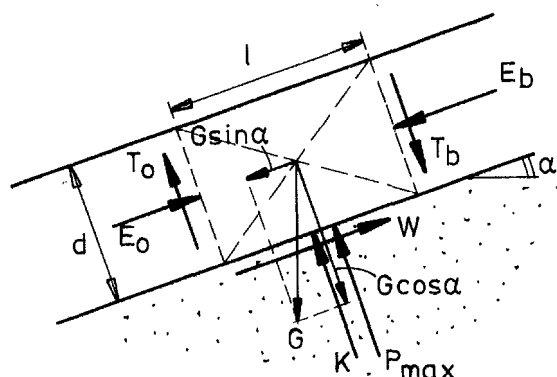
Uit (6) volgt:

$$d \geq \frac{h}{\cos \alpha} \left\{ \frac{\gamma_b}{\gamma_\omega} - 1 \right\}^{-1}$$

$$d \geq \frac{h}{\cos \alpha} \left\{ \frac{\gamma_\omega}{(\gamma_b - \gamma_\omega)} \right\} \quad \text{is gelijk aan (4)}$$

2.3. Duitse formules

In de in de inleiding genoemde duitse literatuurbronnen [lit. 4, 5] worden ook weer formules voor het schuif- en drijfcriterium gepresenteerd, gebaseerd op een algemene evenwichtsbeschouwing die enigszins afwijkt van de beschouwing uit Voorlopig rapport '61. In de duitse evenwichtsbeschouwing worden in eerste instantie de invloeden van normaal- en dwarskrachten in de bekleding, werkend op een denkbeeldig blokje uit de bekleding, meegenomen (zie figuur 3).



Figuur 3: evenwichtsbeschouwing "duitse methode"

Ook eventueel aanwezige cohesie tussen het funderingsmateriaal en de bekleding wordt in de beschouwing meegenomen, waardoor voor de wrijvingskracht moet worden ingevoerd: $W = (c \cdot l + K \tan \phi_v)$. Voor de resulterende kracht door de overdruk wordt in de formules alleen ingevoerd $P_{\max} \cdot l$.

Uit evenwicht evenwijdig aan de bekleding volgt een uitdrukking voor het schuifcriterium: $G \sin \alpha - K \tan \phi_v - c \cdot l - E_o + E_b = 0$.

Uit evenwicht loodrecht op de bekleding volgt een uitdrukking voor het drijfcriterium : $K = G \cos \alpha - P_{\max} \cdot l - T_o + T_b$

Hierna wordt echter gesteld dat $T_o \approx T_b$ en $E_o \approx E_b$ en verder dat in de meeste gevallen waar het funderingsmateriaal uit zand bestaat, de cohesie verwaarloosd mag worden. Er volgt nu weer een formule voor algemeen evenwicht van de bekleding, die identiek is aan de getoonde formule (1) uit Voorlopig rapport '61:

$$P_{\max} = d \cdot \gamma_b (\tan \phi_v - \tan \alpha) \cdot \frac{\cos \alpha}{\tan \phi_v} \quad (7)$$

Uit deze beschouwing zijn uitdrukkingen voor het schuif- en drijfcriterium af te leiden op dezelfde wijze als in 2.1.1. en 2.1.2.

2.4. Samenvatting

De algemene evenwichtsbeschouwing voor een gesloten bekleding, belast met overdruk t.g.v. grondwater onder de bekleding, is voor de drie behandelde methoden vrijwel hetzelfde. Alleen de "duitse methode" laat de mogelijkheid open spanningen in de bekleding mee te nemen; de gepresenteerde formules moeten hierop dan nog wel aangepast worden. De formules voor schuif- en drijfcriterium volgend uit de algemene evenwichtsbeschouwing zijn voor de drie methodes aan elkaar gelijk.

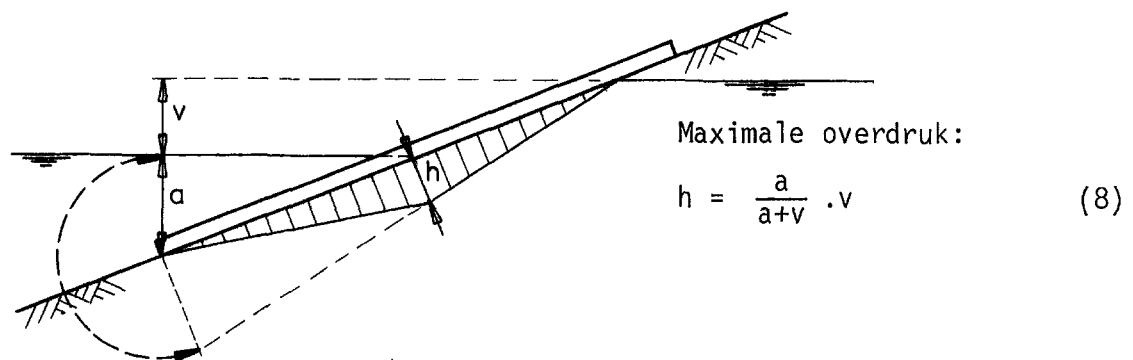
3. Bepaling van de maximale overdruk

In het navolgende zullen dezelfde symbolen zoals ze in de vermelde literatuurbronnen voorkomen, gebruikt worden.

3.1. Methode Voorlopig rapport '61

In het Voorlopig rapport '61 wordt nadrukkelijk geadviseerd om in de berekening een waarde voor de maximaal te verwachten overdruk onder de bekleding in te voeren, die m.b.v. analogons of wiskundige rekentechnieken bepaald is uit de maatgevende ontwerpomstandigheden. Voor globale oriënterende berekeningen kan gebruik worden gemaakt van formules volgens een simpele "driehoeksregel" [lit. 1, 7].

Hierbij wordt een lineaire potentiaalverdeling aangehouden onder de bekleding volgens figuur 4.



Figuur 4: drukverloop volgens de "driehoeksregel".

Er worden m.b.v. deze "driehoeksregel" ook formules gegeven om de invloed van een damwand of teenconstructie mee te nemen [lit. 1].

Er dient nog opgemerkt te worden dat de afgeleide waarde voor h uit de "nederlandse" driehoeksregel niet zo maar in de formules voor het schuif- en drijf criterium uit Voorlopig rapport '61 mag worden gesubstitueerd. In de formules is n.l. niet de stijghoogte aan de onderkant van de bekleding verwerkt, maar de stijghoogte t.o.v. een referentievlak door een punt op de bovenkant van de bekleding (zie figuur 2). Van h moet daarom nog een bedrag $d \cos \alpha$ worden afgetrokken.

3.2. Methode Deltadienst

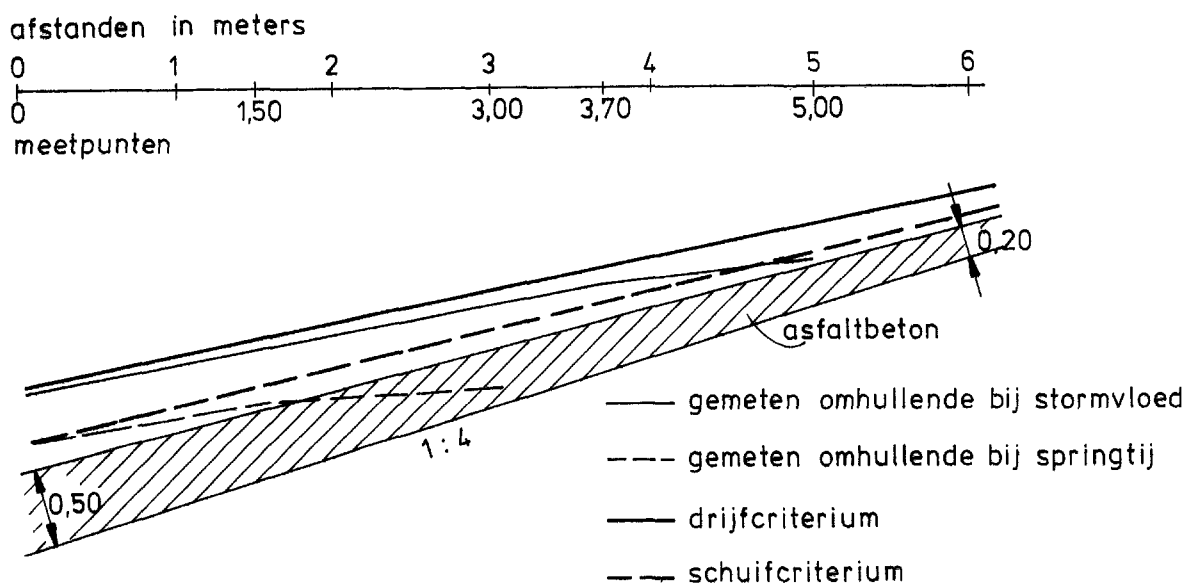
De Deltadienst maakt bij haar advisering gebruik van elektrische analogiemodellen om de maximaal op de bekleding werkende overdrukken te bepalen [lit. 2, 3].

Deze overdrukken worden gemeten in grootheden van potentiaalverschillen tussen boven- en onderkant van de bekleding en worden voor de maatgevende omstandigheden (b.v. springtij voor het schuifcriterium en stormvloed voor het drijfcriterium) op iedere plaats van de bekleding bepaald gedurende de gehele getijperiode.

Zo kunnen daarna de maximaal optredende potentiaalverschillen als functie van de plaats langs de bekleding uitgezet worden in de vorm van omhullenden.

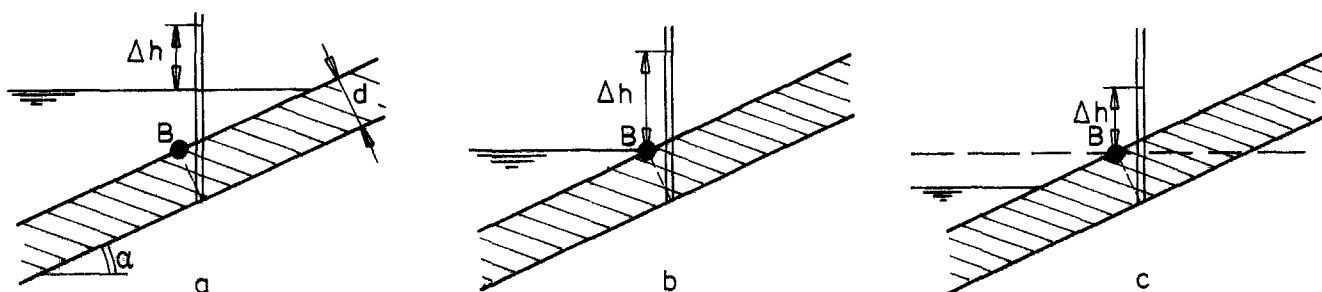
Tevens kunnen omhullenden uitgezet worden van welke potentiaalverschillen die volgens het schuif- en drijfcriterium maximaal mogen optreden bij aangenomen dikte van de bekleding.

De eerstgenoemde omhullenden mogen niet boven de laatstgenoemde komen te liggen, om voor de gehele bekleding aan de criteria te voldoen (zie figuur 5).



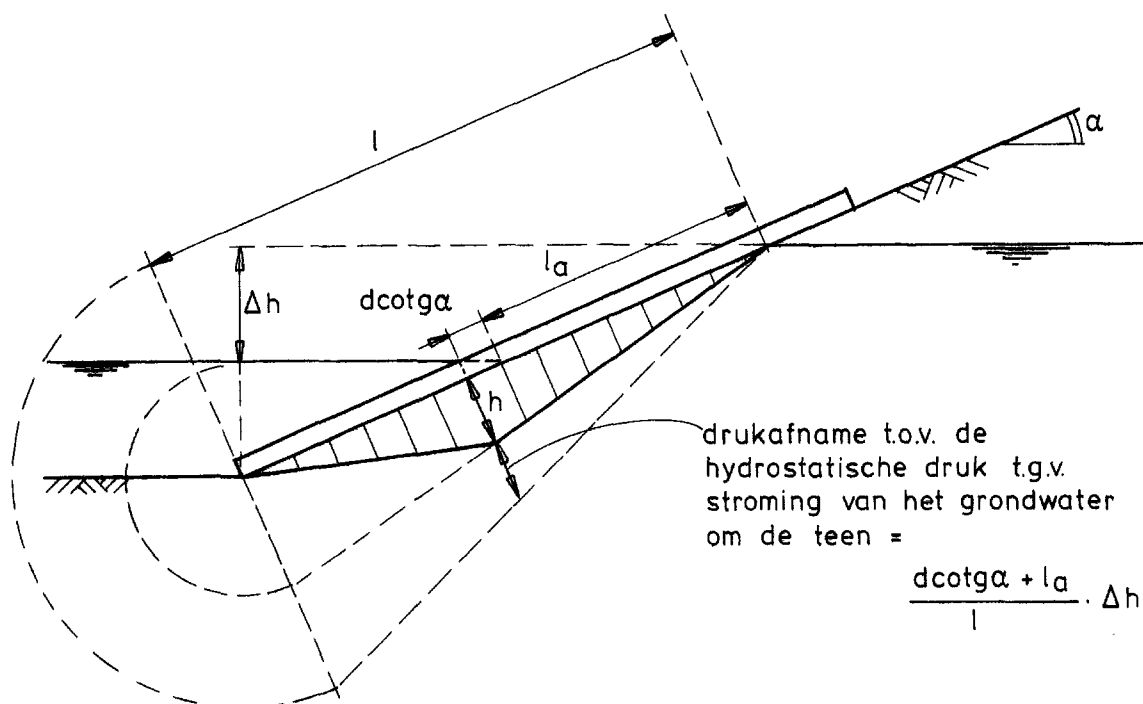
Figuur 5: bepaling maximale overdrukken volgens "methode Deltadienst"

De potentiaalverschillen worden bepaald zoals aangegeven in figuur 6. Zakt de buitenwaterstand beneden het punt B in figuur 6, dan wordt de binnenpotentiaal verder t.o.v. een horizontaal vergelijkingsvlak door punt B gemeten (fig. 6c) om de juiste waarde voor de overdruk te blijven bepalen.



3.3. Duitse methode

Bij de "duitse methode" wordt in de formules voor afschuif- en drijfscriterium een waarde gesubstitueerd voor de maximale overdruk volgens een "driehoeksregel" die enigszins afwijkt van de "nederlandse-driehoeksregel" (zie figuur 7). Het punt waar het maximale potentiaalverschil optreedt is hier over een afstand $d \cot \alpha$ lager aangenomen, wat gezien de aanname in de algemene evenwichtsbeschouwing, waarbij uitgegaan wordt van een evenwichtstoestand loodrecht op de bekleding, beter is. Deze aanpak sluit ook aan bij de methode van de delatdienst, behandeld in 3.2. De potentiaalverdeling langs de onderzijde van de bekleding is overigens hetzelfde aangenomen als bij de "nederlandse" driehoeksregel.



Figuur 7: aangenomen potentiaalverdeling volgens "duitse methode".

Voor h valt af te leiden:

$$h = ((\Delta h + d \cos \alpha) - \frac{l_a + d \cot \alpha}{1} \cdot \Delta h) \cdot \gamma_w \quad (9)$$

De duitse formules voor het afschuif- en drijfcriterium volgen nu uit de beschouwing in 2.3, samen met formule (9).

Hier wordt voor de maximale wateroverdruk dus altijd uitgegaan van een aangenomen driehoekige potentiaalverdeling.

$$\text{Schuifcriterium : } d \geq \frac{\Delta h \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{l_a}{1} - 1\right)}{(\gamma_b \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \phi} - 1\right) - \gamma_w \left(\frac{\Delta h}{1 \cdot \sin \alpha} - 1\right)) \cdot \cos \alpha} \quad (10)$$

$$\text{Drijfcriterium : } d \geq \frac{\Delta h \cdot \gamma_w \left(\frac{l_a}{1} - 1\right)}{(\gamma_w \left(1 - \frac{\Delta h}{1 \sin \alpha}\right) - \gamma_b) \cos \alpha} \quad (11)$$

3.4. Methode volgens van der Veer

Van der Veer [lit. 6] heeft een berekeningsmethode voor bepaling van de maximale overdruk ontwikkeld om de invloeden van taludhelling en het karakter van de optredende grondwaterstroming mee te kunnen nemen. De formules zijn afgeleid m.b.v. de techniek der conforme afbeeldingen. Vergeleken zijn stationaire stroming (constante horizontale aanvoer van grondwater vanuit het dijklichaam), niet stationaire stroming (de freatische lijn is een bewegend vlak; geen stroomlijn) en het reeds behandelde eenvoudige geval van een driehoekig drukverloop volgens de "nederlandse driehoeksregel". Ter plaatse van de buitenwaterstand is de maximale druk onder de bekleding voor $\frac{h}{H} < 0,8 \text{ à } 0,85$ (figuur 8):

$$P_{\max} = \alpha \cdot h \cdot g \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (12)$$

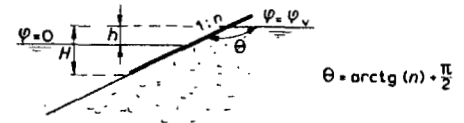
Verondersteld is dat het verhang van de freatische lijn gering is en er zich geen storende invloeden voordoen op zeer korte afstand.

$$\text{Voor stationaire stroming is } \alpha_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{h}{H}\right)^{\frac{\pi}{\theta}}} \quad (13)$$

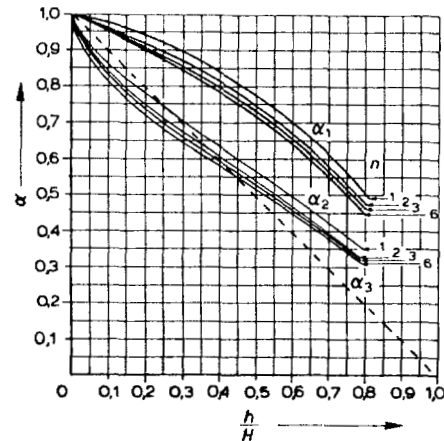
$$\text{Voor niet stationaire stroming is } \alpha_2 = \frac{1}{\pi} \cdot \arccos \left\{ 2 \left(\frac{h}{H}\right)^{\frac{\pi}{\theta}} - 1 \right\} \quad (14)$$

Voor een driehoekig drukverloop is $\alpha_3 = 1 - \left(\frac{h}{H}\right)$ (15)

In figuur 8 zijn de drie gevallen in een grafiek uitgezet.



Figuur 8: vergelijking over-
drukcoëfficiënten volgens
van der Veer.



In het geval van stationaire stroming blijken de overdrukken aanzienlijk groter te zijn dan het geval van een freatisch vlak wat niet (van binnen uit) gevoed wordt.

In werkelijkheid zullen de overdrukken tussen deze beide extreme situaties in liggen.

Het driehoekig drukverloop geeft een redelijke benadering voor lage waarden van $\left(\frac{h}{H}\right)$. Voor situaties met constante aanvoer van grondwater van binnen uit het dijklichaam en voor grote waarden voor $\left(\frac{h}{H}\right)$ geeft de driehoeksregel te lage waarden.

3.5. Samenvatting

In "Voorlopig rapport '61" wordt geadviseerd bij dimensionering van gesloten bekledingen de in de berekening in te voeren waarde voor de maximale overdruk te bepalen m.b.v. analogons of wiskundige reken-technieken. Voor globale oriënterende berekeningen mag gebruik worden gemaakt van de simpele driehoeksregel. De Deltadienst maakt gebruik van elektrische analogiemodellen om de maximale overdrukken te bepalen. De "duitse methode" voert voor de maximale overdruk een waarde in afkomstig van een driehoeksregel die enigszins afwijkt van de nederlandse en deze zal hierdoor grotere waarden voor de maximale overdruk geven. De "methode van der Veer" toont aan dat in de meeste gevallen de driehoeksregel een redelijke benadering van de werkelijkheid is, maar in sommige gevallen een onderschatting van de maximale overdruk kan geven.

4. Vergelijking van de methoden

4.1. Rekenvoorbeeld

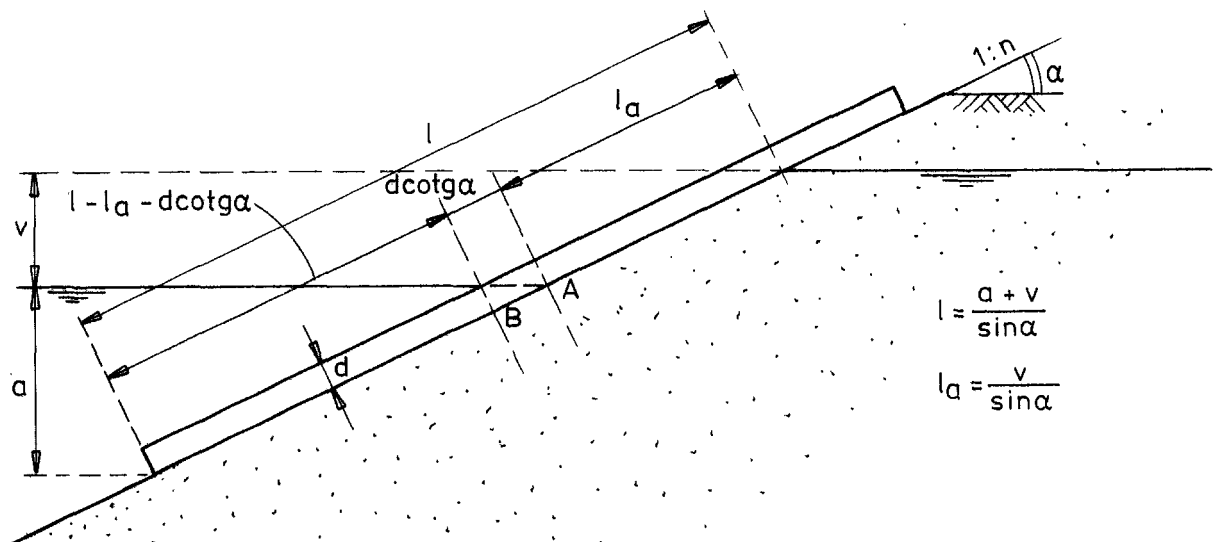
Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat de behandelde methoden gebaseerd zijn op dezelfde algemene evenwichtsbeschouwing, waaruit een formule voor regelmatig terugkerende omstandigheden volgt (het schuifcriterium) en een formule voor ontwerpomstandigheden (het drijf criterium). Deze formules zijn voor alle methoden identiek. Hiermee kan de dikte van de bekleding bepaald worden aan de hand van berekende grondwateroverdrukken en vastgestelde grondparameters.

De grootte van deze te berekenen maximale overdrukken varieert met de toe te passen methode om ze te bepalen.

Er is voor een aantal gevallen de benodigde dikte voor de bekleding volgens het afschuifcriterium (een criterium, waaraan de bekleding bij regelmatig voorkomende overdrukken, moet voldoen) en drijf criterium (een criterium, waaraan de bekleding bij overdrukken die 1 à 2 keer per jaar voorkomen moet voldoen) bepaald m.b.v. de volgende methoden (zie figuur 9):

- 1^e "Nederlandse methode" met de driehoeksregel.
- 2^e "Nederlandse methode" met formule (13) van v.d. Veer.
- 3^e "Nederlandse methode" met formule (14) van v.d. Veer.
- 4^e "Duitse methode" met de duitse driehoeksregel.

Eenvoudigheidshalve zullen voor het schuif- en drijf criterium dezelfde maximale overdruk als uitgangspunt worden aangehouden, wat inhoudt dat deze uitkomsten vooral niet met elkaar vergeleken moeten worden.



Figuur 9: principeschets vergelijkende berekeningen.

In de vergelijkende berekeningen is $\gamma_a = 20 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$; $\phi = \phi_v = 40^\circ$. Voor de volgende combinaties van a, v en n zijn m.b.v. deze gegevens de benodigde bekledingsdiktes uitgerekend:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| - n = 3: a = 1,5, v = 1,5 | - n = 3: a = 1,0, v = 1,5 |
| a = 1,5, v = 1,0 | a = 1,0, v = 1,0 |
| a = 1,5, v = 0,5 | a = 1,0, v = 0,5 |
- n = 5: a en v idem als bij n = 3.
- n = 8: a en v idem als bij n = 3.

De resultaten zijn gepresenteerd in de tabel en de grafieken op bijlage 1 t/m 5.

4.2. Conclusies uit de vergelijkende berekeningen

- De formules afgeleid voor het schuifcriterium geven alleen reële waarden voor de bekledingsdikte als de taludhoek kleiner is dan een kritische waarde. Deze kritische taludhoek α_k valt af te leiden uit de formule voor het schuifcriterium (3) of direct uit een algemene evenwichtsbeschouwing evenwijdig aan de bekleding.

Er moet altijd gelden: $(\tan \alpha = \frac{1}{n})$

$$(\gamma_b - \gamma_w) \cdot \tan \phi - \gamma_b \tan \alpha \geq 0.$$

$$\tan \alpha \leq \frac{\gamma_b - \gamma_w}{\gamma_b} \cdot \tan \phi$$

$$\alpha_k = \arctan \left(\frac{\gamma_b - \gamma_w}{\gamma_b} \cdot \tan \phi \right)$$

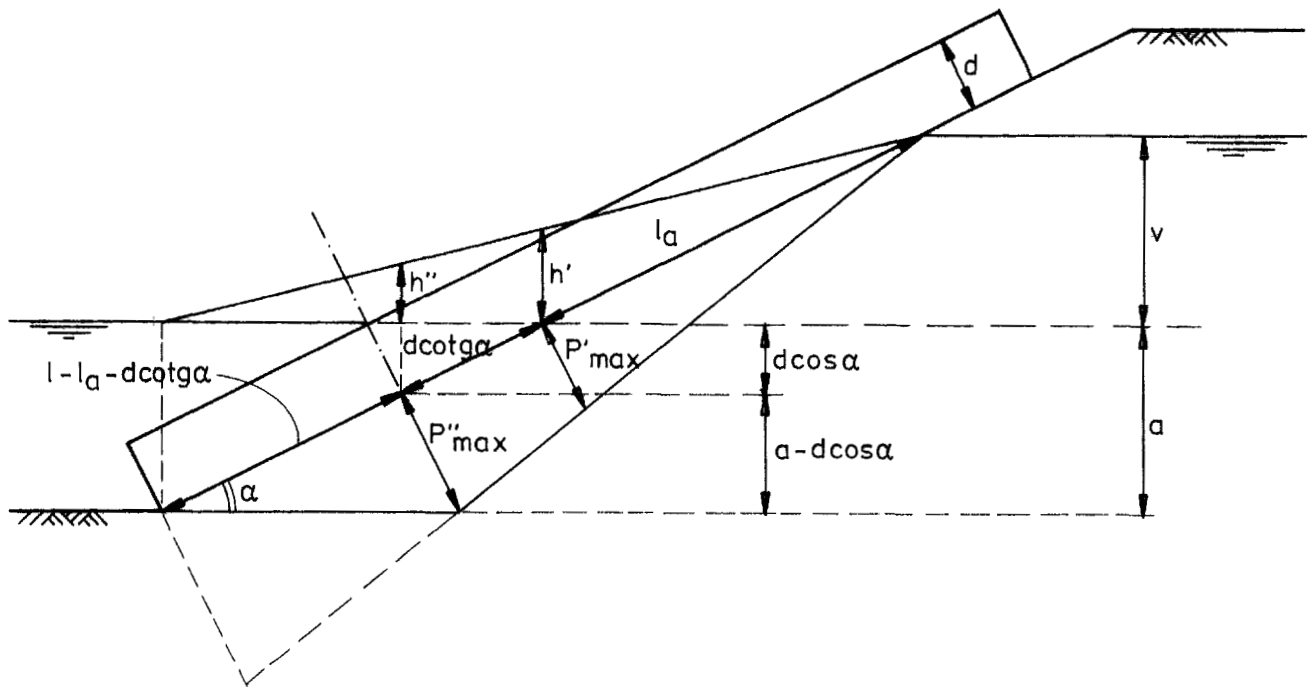
Dit betekent dat bij overschrijden van α_k , er ook zonder overdruk geen evenwicht is.

Zou de taludhoek groter worden dan deze α_k , dan wordt niet meer voldaan aan de aannamen uit de algemene evenwichtsbeschouwing (evenwicht evenwijdig aan de bekleding). Taludhoeken iets kleiner dan de kritische leveren zeer grote waarden op voor de benodigde bekledingsdikte.

- De benodigde dikten volgens het schuif- en drijfcriterium, bepaald m.b.v. de "nederlandse" en "duitse" driehoeksregel, liggen erg ver uiteen.

Aan de hand van figuur 10 wordt dit als volgt nader toegelicht:

In de beschouwing is $P_{\max}$ de maximale waterspanning onder de bekleding en h is de stijghoogte in [m] onder de bekleding.



Figuur 10: Vergelijking tussen "nederlandse" en "duitse" driehoeksregel.

Maatgevende maximale overdruk:

volgens de "nederlandse" driehoeksregel: $P'_{\max} = h' = \frac{a}{a+v} \cdot v$.

volgens de "duitse" driehoeksregel: $P''_{\max} = h'' + d \cos \alpha$ waarin:

$$h'' = \frac{l - l_a - d \cot \alpha}{l} \cdot v \quad \text{Uit een congruentiebeschouwing volgt nu :}$$

$$h'' = \frac{a - d \cos \alpha}{a+v} \cdot v = \frac{a}{a+v} \cdot v - \frac{d \cos \alpha}{a+v} \cdot v$$

Een vergelijking tussen beide methoden levert verder nog op dat:

$$P'_{\max} = \gamma_w \left\{ \frac{a}{a+v} \cdot v \right\}$$

$$\begin{aligned} P''_{\max} &= \gamma_w \left\{ \frac{a}{a+v} \cdot v - \frac{d \cos \alpha}{a+v} \cdot v + d \cos \alpha \right\} = \\ &= \gamma_w \left\{ \frac{a}{a+v} \cdot v + \frac{a}{a+v} \cdot d \cos \alpha \right\} \end{aligned}$$

$$\text{Hieruit volgt dat } P''_{\max} = P'_{\max} \cdot \left(1 + \frac{d}{v} \cdot \cos \alpha \right)$$

Er dient opgemerkt te worden dat de duitse driehoeksregel afgeleid is in overeenstemming met de aannamen van de algemene evenwichtsbeschouwing. De $P''_{\max}$ wordt bepaald op de lijn van evenwichtsbeschouwing aan de onderzijde van de bekleding (zie fig. 2).

Bij de nederlandse driehoeksregel is de $P'_{\max}$ bepaald op het niveau van de buitenwaterspiegel aan de onderzijde van de bekleding. De waarden voor de maximale waterdruk die in het schuif- en drijf-criterium gesubstitueerd dienen te worden, zijn het beste, indien van de driehoeksregel gebruik wordt gemaakt volgens de duitse methode.

- De benodigde bekledingsdikte volgend uit de formule voor het drijf-criterium is vrijwel onafhankelijk van de taludhelling.
- De verschillen in benodigde bekledingsdikte zijn vooral voor het schuifcriterium uitermate sterk afhankelijk van de gekozen methode ter bepaling van de maximale overdruk. De vergelijkende berekeningen tonen aan dat voor grotere taludhellingen (in de buurt van de kritische) en kleinere waarden van v de verschillen relatief gezien toenemen. Voor het drijfcriterium zijn de verschillen kleiner, maar toch nog groot.
- Vergelijking tussen de benodigde bekledingsdikten volgens de nederlandse driehoeksregel en die volgens de formules van Van der Veer laat zien, dat de driehoeksregel een goede benadering is van die gevallen, waarbij uitsluitend grondwater rond de teen het dijklichaam binnen kan dringen (niet stationaire stroming; formule (14)). Bij het geval van stationaire stroming van binnen uit het dijklichaam (formule (13)) geeft de nederlandse driehoeksregel te lage waarden, vooral voor hoge waarden van $\frac{v}{a+v}$.

Dit geldt zowel voor het schuif- als voor het drijf criterium.

- Vergelijking tussen de benodigde bekledingsdikten volgens de nederlandse driehoeksregel en die volgens de duitse driehoeksregel laat zien, dat met name voor het schuifcriterium de verschillen zeer groot zijn ($\approx$ een factor 2). Nogmaals dient opgemerkt te worden dat de oorzaak hiervan is het plaatsverschil in vaststellen van de maximale overdruk, waardoor de duitse waarde voor de overdruk een factor $(1 + \frac{d}{v} \cdot \cos \alpha)$ hoger wordt dan die welke volgt uit de nederlandse driehoeksregel. Eenvoudig is in te zien, dat naarmate α en/of v groter worden, de factor in waarde afneemt.
- Eigenlijk kan de duitse methode niet vergeleken worden met de nederlandse inclusief v.d. Veer, omdat de plaats van de optredende maximale overdruk volgens de nederlandse driehoeksregel niet in overeenstemming is met de aanname uit de algemene evenwichtsbeschouwing.

Zowel de nederlandse driehoeksregel als de waarden voor de wateroverdruk volgend uit de formules van Van der Veer behoren bepaald te worden ter plaatse van de lijn van evenwichtsbeschouwing i.p.v. op een afstand $d \cos \alpha$ hoger aan de onderzijde van de bekleding (zie figuur 10). De benodigde bekledingsdikten zouden dan voor de duitse en nederlandse methode m.b.v. de driehoeksregel zowel voor het schuif- als drijf criterium elkaar gelijk zijn. De waarden voor de overdruk volgend uit de methode Van der Veer zullen ook bij benadering met de factor $(1 + \frac{d}{v} \cos \alpha)$ vermenigvuldigd moeten worden, om ze vergelijkbaar te maken met de duitse methode.

5. Conclusies

De behandelde methoden maken allen gebruik van dezelfde evenwichtsbeschouwing. De duitse methode geeft de mogelijkheid om dwars- en normaalkrachten in te voeren, maar bij de afleiding van de formules voor schuif- en drijf criterium wordt dit weer verwaarloosd.

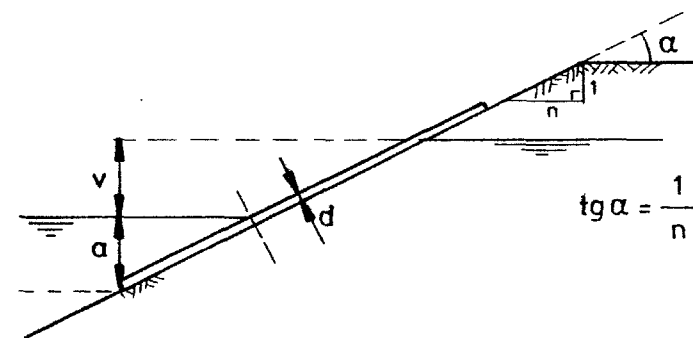
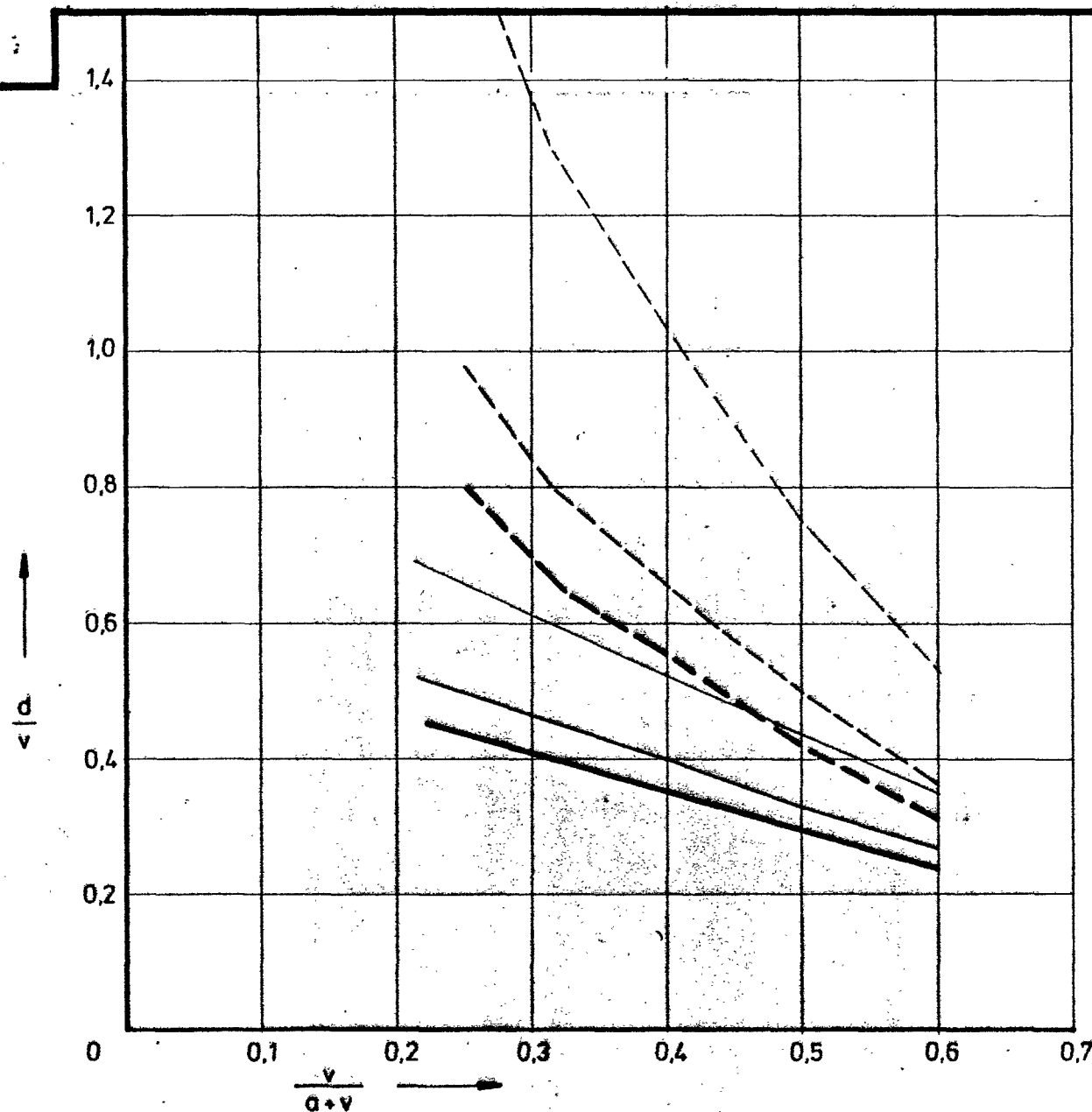
- De evenwichtsbeschouwing, zoals bij de behandelde methoden toegepast, toont aan dat er een kritische taludhoek α_k bestaat, waarvan de grootte bepaald wordt door de verhouding tussen de parameters γ_b , γ_w en ϕ_v . Indien de taludhoek groter zou zijn dan deze waarde leveren de formules geen reële waarden meer op voor de benodigde bekledingsdikten. Dit betekent dat er ook zonder wateroverdruk geen evenwicht is indien deze waarde bereikt of overschreden wordt.
Taludhoeken kleiner maar in de buurt van deze kritische waarde leveren zeer grote waarden op voor de benodigde bekledingsdikte tegen afschuiven.
- Wordt voor globale, oriënterende berekeningen gebruik gemaakt van "de driehoeksregel" voor bepaling van de wateroverdruk, dan is de duitse driehoeksregel een betere benadering dan de nederlandse. Bij de nederlandse methode wordt de maatgevende maximale overdruk op een te hoge plaats op het talud bepaald zodat deze een factor $(1 + \frac{d}{v} \cdot \cos \alpha)$ te laag is (zie 4.2.). Derhalve levert de nederlandse regel bij dimensionering te lage waarden voor de bekledingsdikte.
- De formules van Van der Veer tonen aan dat de plaats en grootte van de maximale waterdruk volledig bepaald wordt door het grondwaterstromingsbeeld, wat sterk afhankelijk is van de plaatselijke omstandigheden.
- Voor ontwerp berekeningen verdient het aanbeveling de maximale waterdruk te bepalen m.b.v. analogons of numerieke rekentechnieken. Belangrijk daarbij zijn kennis van de grondgesteldheid en grondparameters (k-waarde) die grote invloed op het resultaat hebben.

6. Literatuur

1. "Voorlopig rapport '61" van de werkgroep "Gesloten dijkbekledingen".
2. "Criteria voor het bepalen van de dikte van asfaltbekledingen op dijken, die worden belast door quasi-statische waterdrukken". Nota DDWT-81.328 van de Deltadienst.
3. Handleiding postacademiale cursus "Asfalt in de waterbouwkunde" (hoofdstuk CT.AW.3) door ir. J. Kwak.
4. "Seedeichbau-Theorie und Praxis", K.H. Bröszkamp (hoofdstuk 2 door E. Franke).
5. "Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau" van "Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V." (Ausgabe '77).
6. Kust en Oeverwerken in praktijk en theorie, hoofdstuk III "Grondwaterbeweging onder oeverconstructies" van dr.ir. P. van der Veer.
7. "Waterspanningen onder de asfaltbekledingen van dijken" door ir. W.C. Bischoff van Heemskerck (VBW - uitgave 1961).

Methode	a	v	a.c. d.c.	mbv Nederlandse Δ regel resp. Duitse Δ regel			mbv v.d. Veer form. 13			mbv v.d. Veer form. 14		
				n=3	n=5	n=8	n=3	n=5	n=8	n=3	n=5	n=8
Nederlandse	1,5	1,5	a.c.	0,66	0,50	0,44	0,96	0,73	0,64	0,69	0,52	0,45
			d.c.	0,40	0,38	0,38	0,58	0,55	0,54	0,41	0,39	0,38
	1,5	1,0	a.c.	0,52	0,40	0,36	0,70	0,53	0,46	0,52	0,39	0,34
			d.c.	0,32	0,31	0,30	0,42	0,40	0,40	0,31	0,30	0,29
	1,5	0,5	a.c.	0,33	0,25	0,22	0,39	0,29	0,26	0,30	0,23	0,20
			d.c.	0,20	0,19	0,19	0,23	0,22	0,22	0,18	0,17	0,17
	1,0	1,5	a.c.	0,52	0,40	0,36	0,86	0,65	0,57	0,60	0,45	0,39
			d.c.	0,32	0,31	0,30	0,52	0,50	0,49	0,36	0,34	0,34
	1,0	1,0	a.c.	0,44	0,33	0,30	0,64	0,48	0,42	0,46	0,34	0,30
			d.c.	0,26	0,25	0,25	0,39	0,37	0,36	0,28	0,26	0,26
	1,0	0,5	a.c.	0,29	0,22	0,20	0,37	0,28	0,24	0,28	0,21	0,18
			d.c.	0,18	0,17	0,17	0,22	0,21	0,21	0,17	0,16	0,16
Duits	1,5	1,5	a.c.	1,12	0,75	0,63	a.c. = waarde gevonden uit formule voor het afschuifcriterium d.c. = waarde gevonden uit formule voor het drijfscriterium					
			d.c.	0,53	0,51	0,50						
	1,5	1,0	a.c.	1,04	0,66	0,55						
			d.c.	0,45	0,44	0,43						
	1,5	0,5	a.c.	0,87	0,49	0,40						
			d.c.	0,32	0,31	0,30						
	1,0	1,5	a.c.	0,79	0,54	0,46						
			d.c.	0,40	0,38	0,38						
	1,0	1,0	a.c.	0,75	0,50	0,42						
			d.c.	0,35	0,34	0,34						
	1,0	0,5	a.c.	0,65	0,40	0,32						
			d.c.	0,26	0,25	0,25						

Tabel 1: resultaten rekenvoorbeeld; benodigde dikten van de bekleding [m] .



	ned. Δ-regel	duitse Δ-regel
n = 3	—	- - -
n = 5	—	- - -
n = 8	—	- - -

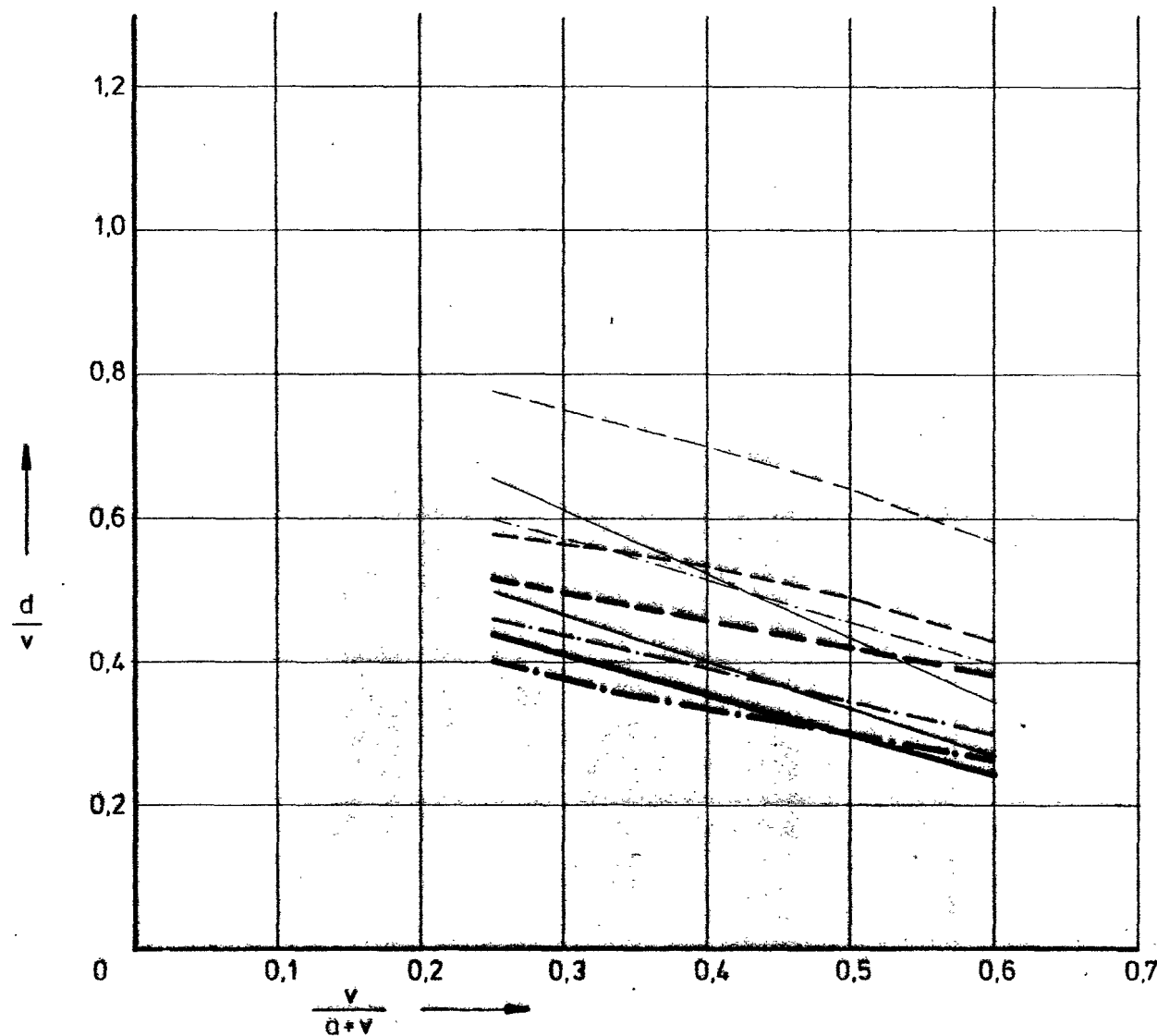
CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

grafiek 1

$\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het afschuifcriterium

get	gew	gez	Schaal —	Bijlage 2
32/12/22	03/01/25	32	werknr S-83 003	tek nr A4- 82.105



	ned. Δ-regel	formule (13) van v.d. Veer	formule (14) van v.d. Veer
$n=3$	—	- - -	- . - . -
$n=5$	—	- - -	- . - . -
$n=8$	—	- - -	- . - . -

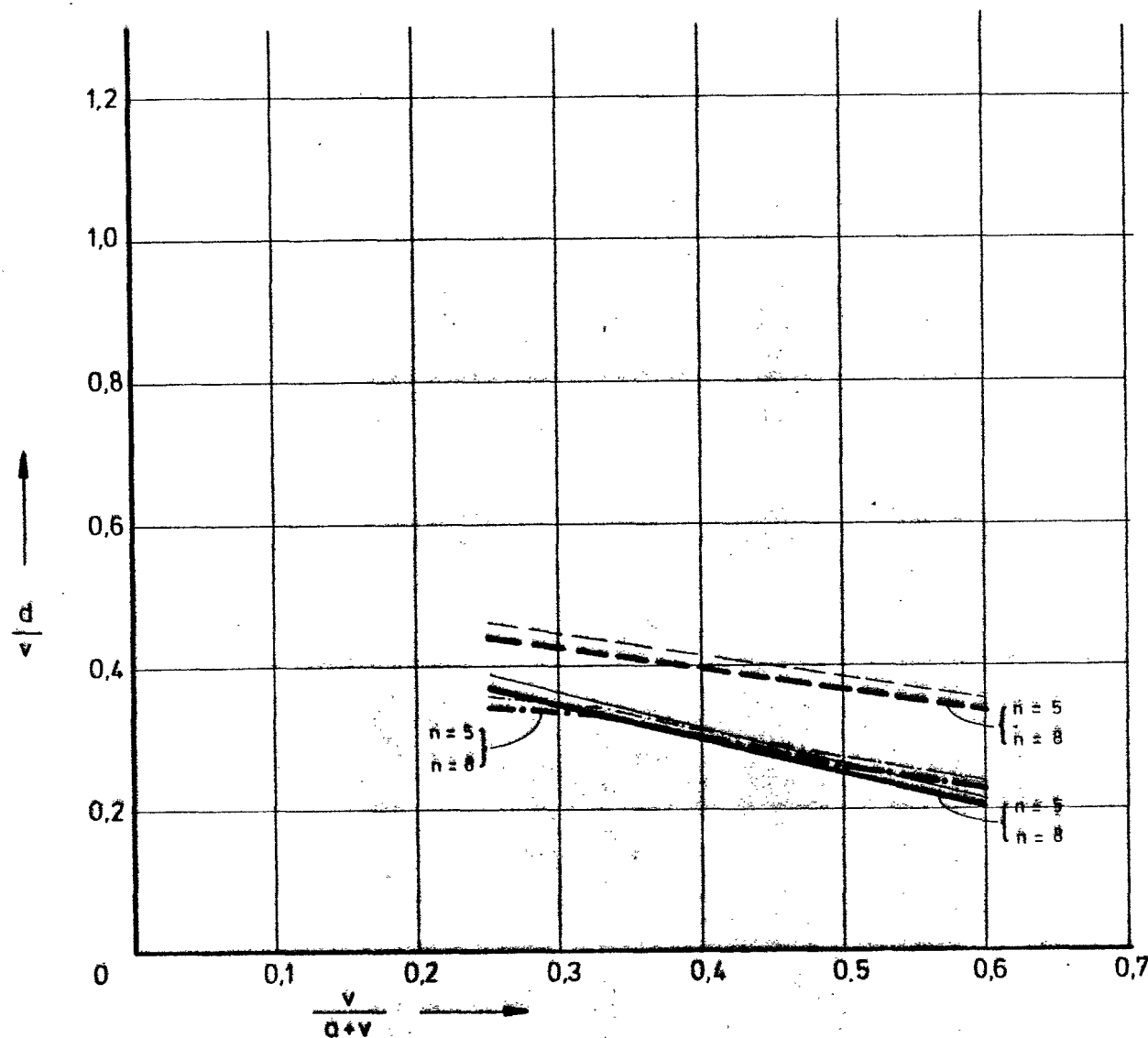
CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

grafiek 3

$\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het afschuifcriterium

get	gew	gez	Schaal	Bijlage
82/12/22	24/05/05	JV.	—	4
			werknr S-83.003	tek nr A4-82.107



ned. Δ -regel

formule (13)
van v.d. Veer

formule (14)
van v.d. Veer

$n = 3$

—

-.-.-

$n = 5$

—

-.-.-

$n = 8$

—

-.-.-

CO/W

grafiek 4

$\frac{d}{v} = f\left(\frac{v}{a+v}\right)$ voor het drijfcriterium

get

gew

gez

Schaal —

Bijlage 5

82/12/22

Subst

JV

werknr S-83.003

tek nr A4-82.108

Rapportage simulatie grondwater-
beweging in zeedijken m.b.v. elec-
trische analogonmodellen

S-83.003

(notitie nr. 83-14, 2^e versie)

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

ir. J.T. de Vries

Maart 1983.

(2^e versie april 1984)

Voorwoord

Deze notitie is oorspronkelijk afgerond in maart 1983 bij het vertrek van ir. De Vries bij het COW.

In de versie van maart 1983 was nogal de nadruk gelegd op vervolgonderzoek met het programma GROFLOD omdat het de bedoeling was hiermee op korte termijn verder te gaan.

Inmiddels is gebleken dat er mogelijkheden waren om het onderzoek intensiever dan voorheen voort te zetten bij de Deltadienst met Teledeltospapier en Elnag. Binnen ca. twee jaren zal een eindrapport van dit onderzoek gereedkomen.

Verder is door allerlei oorzaken het werk met GROFLOD uitgesteld.

Eén en ander was aanleiding om de notitie van maart 1983 enigszins aan te passen en om de opmerkingen gemaakt door ing. J. van der Burg en ing. E. Troost van de Deltadienst te verwerken in de nieuwe versie.

De aangepaste 2^e versie kan verder als een tussenrapport van het onderhavige onderzoek worden beschouwd.

ir. E.H. Ebbens.

centrum voor onderzoek waterkeringen

Notitie nr.: 83-14

datum: maart 1983

Aan :

(2^e versie april 1984)

Van : ir. J.T. de Vries

Inzake : Rapportage simulatie grondwaterbeweging in zeedijken m.b.v.
electrische analogonmodellen S-83.003.

Bijlage :

Afschrift :

<u>Inhoud</u>	<u>Blz.</u>
1. Inleiding	2
2. Gegevens uit de metingen.	3
3. Conclusies uit de metingen.	7
3.1. Variatie in dikte (D) van het watervoerend pakket.	8
3.2. Variatie in strandhoogte.	11
3.3. Variatie in daalsnelheid van de windopzet.	15
3.4. Effect van asfaltslab voor de teen.	16
3.5. Invloed van de doorlatendheid op de maximale overdrukken als functie van de afstand uit de teen.	19
3.6. De plaats van het maximum van de maximaal optredende over- druk onder de bekleding als functie van de doorlatendheid.	21
4. Vervolgonderzoek.	23
4.1. Vervolgonderzoek naar andere modelschematiseringen.	30
4.1.1. Dijklichaam met gedeeltelijk open-, gedeeltelijk dichte bekleding.	30
4.1.2. Dijklichaam met geheel open bekleding.	30
4.1.3. Gesloten (en/of open-) bekleding op doorlatende laag.	30
4.1.4. Doorlatende teenconstructie.	31
4.1.5. Dijklichaam bestaande uit meerdere grondsoorten (zand, klei, mijnsteen etc.).	31
Literatuur.	32

Tekeningen (bijlagen 1 t/m 3)

- Randvoorwaarde
- Paar krommen als voorbeeld.
- Appendix.

1. Inleiding

Als eerste aanzet voor onderzoek naar de grondwaterbeweging in zeedijken, ten behoeve van werkgroep 4 "Dijkbekledingen" van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, zijn door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen oriënterende prototypemetingen verricht in het buitentalud van de Brouwersdam. Voor de resultaten hiervan kan verwezen worden naar het COW-rapport "Peilbuiswaarnemingen Brouwersdam in de periode november 1979-november 1981" (S-71.066) [1].

Dit in-situ onderzoek is hierna vervolgd met metingen in een locatie op de Lauwerszeedijk.

Naast de genoemde prototypemetingen zijn resultaten van bij de Deltadienst uitgevoerde metingen met een electrisch -analogon (teledeltosmodellen) geanalyseerd en verwerkt in een COW-notitie "Voortplanting van een extreme stormvloed in een dijklichaam met gesloten bekleding" (COW-notitie nr. 82-10) [2].

Op basis van de inzichten verkregen uit het tot dan toe uitgevoerde onderzoek is door het COW in overleg met de Deltadienst een meetplan opgesteld voor een vervolgonderzoek m.b.v. teledeltosmodellen.

Dit onderzoek is voor het COW door een HTS-praktikant uitgevoerd (T. Berkhout) bij de Deltadienst, onderafdeling Praktijkadvies en Analoge modellen te Rijswijk. Er zijn gevoeligheidsmetingen gedaan met teledeltosmodellen naar de respons van een extreme stormvloed in zeedijken met een gesloten bekleding. De opzet van dit systematisch onderzoek is beschreven in een door de HTS-praktikant opgemaakt meetverslag.

Dit is als appendix bij dit verslag gevoegd.

De resultaten van de meetserie zullen in de volgende hoofdstukken worden besproken en getracht is de belangrijkste conclusies uit het onderzoek weer te geven. Mede op basis van deze conclusies wordt het onderzoek thans voortgezet bij de Deltadienst.

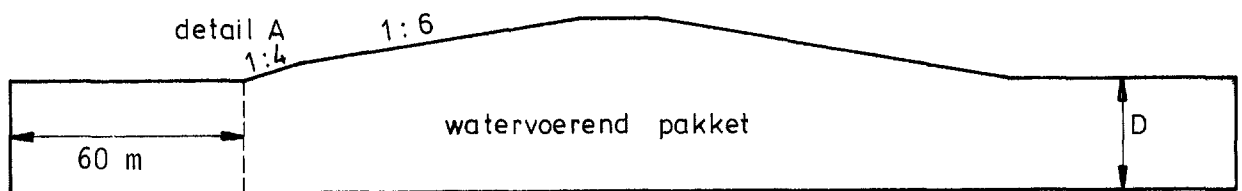
Opgemerkt kan worden dat voor het COW door een TH-student een numeriek model ontwikkeld is waarmee o.a. de dijkgeometriën zoals ze in het analogon-onderzoek zijn doorgemeten kunnen worden doorgerekend op een computer. Ook hiermee kan verder onderzoek verricht worden.

Dit programma "GROFLOD" is beschreven in [3].

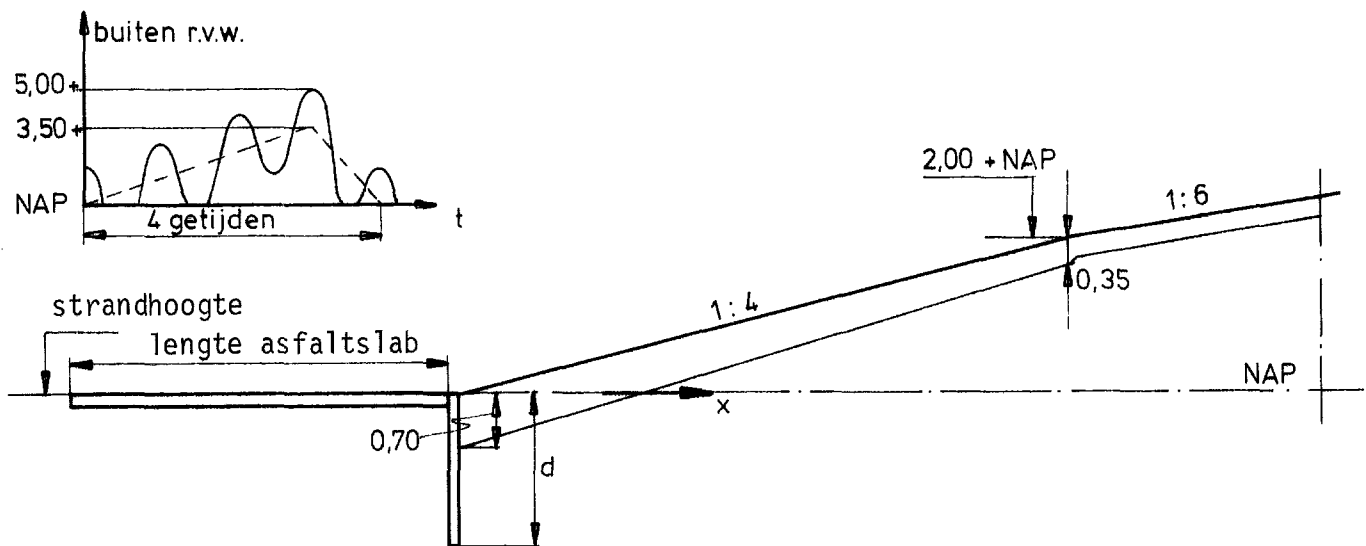
2. Gegevens uit de metingen

De meetresultaten van het systematisch gevoeligheidsonderzoek zijn bij het COW aanwezig onder projectnummer S-83.003.

Aan de hand van de modelschematisering zoals getoond in figuur 1 wordt hierna een overzicht gegeven van het aantal uitgevoerde metingen in tabel 1.



modelschematisatie



teenconstructie (detail A)

teenconstructie (detail A)

Figuur 1: modelschematisering met detail van de teenconstructie

meting	D[m]	d[m]	strandhoogte t.o.v. NAP [m]	daalsnelheid t.o.v. NAP [cm/uur]	binnenpeil t.o.v. NAP	lengte asfalt- slab [m]
1	30	0	0	28,2	0	0
2	30	2	0	28,2	0	0
3	20	2	0	28,2	0	0
4.1	10	2	0	28,2	0	0
4.2	10	2	0	14,1	0	0
4.3	10	2	1	28,2	0	0
5.1	5	2	0	28,2	0	0
5.2	5	2	0	14,1	0	0
5.3	5	2	1	28,2	0	0
6.1	3	2	0	28,2	0	0
6.2	3	2	0	14,1	0	0
6.3	3	2	0	28,2	0	5

Tabel 1: overzicht van de uitgevoerde metingen

Bij alle in tabel 1 voorkomende metingen is op een aantal meetpunten (1 t/m 25 en A t/m C) de respons op de buitenrandvoorwaarde als functie van de tijd vastgelegd in grafiekvorm. Voor vier verschillende k-waarden ($3 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-4}$ en $1 \cdot 10^{-3}$ m/s).

Voor deze grafieken en de plaats van de meetpunten wordt verwezen naar de meetresultaten onder projectnummer S-83.003.

Uit deze grafieken zijn voor alle metingen een aantal verbanden gehaald die in grafiekvorm eveneens te vinden zijn bij de meetresultaten. Deze verbanden zijn:

- overdruk onder de bekleding Δh als functie van de doorlatendheid in een aantal meetpunten ($x=0,20$; 1; 2; 4,5; 6,5; en 9 m).
- de omhullenden van de maximale overdruk Δh als functie van x (= afstand uit de teen) voor de vier verschillende doorlatenheden.
- het verloop van de waterspanningspotentialen onder de bekleding en frea-tische lijn in het dijklichaam als functie van x (= afstand uit de teen) voor de vier verschillende doorlatendheden ten tijde van de maximale buitenwaterstand (= NAP + 5,00 m).

- Idem ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 3,00 m na de stormvloedtop.
- Idem ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m na de stormvloedtop.

Uit deze door HTS-praktikant Berkhout gemaakte grafieken zijn hierna bij het COW een aantal verbanden uitgewerkt.

Bekeken zijn de invloed op de stijghoogte c.q. overdruk van:

- damwand
- de dikte van het watervoerend pakket (D).
- de strandhoogte (s.h.).
- de daalsnelheid (d.s.) van de windopzet.
- de asfaltslab voor de teen (a.s.).

Dit is gedaan op tijdstippen overeenkomend met een buitenwaterstand van respectievelijk de maximumwaarde NAP + 5,00 m en de na maximum hoogwater optredende waarden NAP + 3,00 m en 2,00 m. Daarbij is de doorlatendheid van het zand als volgt gevarieerd:

$k=3 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s en $k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

De gevoeligheid van de maximale overdrukken voor de genoemde parameters is uitgewerkt als functie van x. De resultaten zijn eveneens in grafiek-vorm bij de meetresultaten gevoegd (S-83.003).

Deze grafieken zijn niet bij deze notitie gevoegd en zijn als volgt onderverdeeld:

- Grafiek 1 t/m 12

Gegeven zijn het effect van D, het effect van de strandhoogte, het effect van de daalsnelheid en het effect van de asfaltslab op het stijghoogteverloop in het dijklichaam als functie van de afstand uit de teen. Dit is gedaan voor de drie doorlatendheden $k=3 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=10^{-4}$ m/s en $k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s op het tijdstip van maximale waterstand buiten (=maximaal stormvloedpeil=NAP + 5,00 m).

- Grafiek 13 t/m 24

Idem grafiek 1 t/m 12 maar nu voor het tijdstip overeenkomend met een buitenwaterstand van NAP + 3,00 m na de stormvloedtop.

- Grafiek 25 t/m 36

Idem grafiek 1 t/m 12 maar voor het tijdstip overeenkomend met een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m na de stormvloedtop.

- Grafiek 37 t/m 48

Gegeven zijn het effect van de dikte van het watervoerend pakket, het effect van de strandhoogte, het effect van de daalsnelheid en het effect van de asfaltslab op de maximaal optredende overdruk als functie van de afstand uit de teen. Dit is weer herhaald voor drie doorlatendheden van het dijklichaam nl. $k=3 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=10^{-4}$ m/s en $k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

- Grafiek 49 t/m 60

Gegeven zijn het effect van de dikte van het watervoerend pakket, het effect van de strandhoogte en het effect van de asfaltslab op de maximaal optredende potentiaal in een aantal meetpunten voor verschillende tijdstippen vanaf de stormvloedtop. Dit is gedaan voor de doorlatendheden van het dijklichaam $k=3 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s en $k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Opgelegde randvoorwaarde

Bij alle metingen behalve de metingen 4.2, 5.2 en 6.2 (effectdaalsnelheid van de windopzet) is een randvoorwaarde voor de buitenwaterstand aangehouden zoals gegeven is op bijlage 1.

Gedurende drie getijperioden van 12h 25 min is op een windopzet van NAP + 3,50 m een springtij met een amplitude van 1,50 m gesuperponeerd.

De windopzet valt na het moment van maximale buitenwaterstand (stormvloedtop is NAP + 5,00 m) in één getijperiode terug (daalsnelheid-windopzet is ≈ 30 cm/uur).

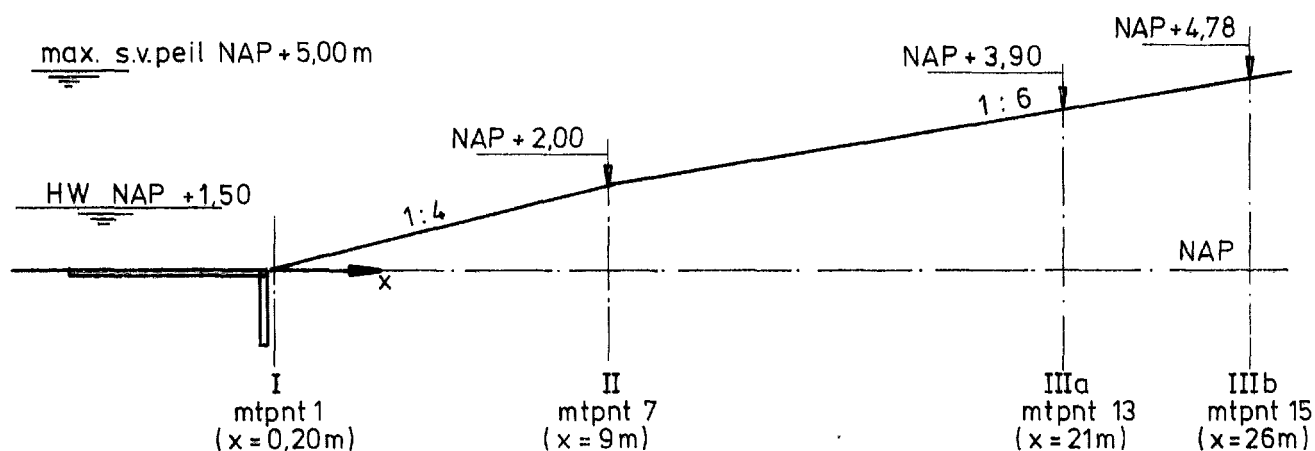
Opgemerkt dient te worden dat bij het systematisch onderzoek de hiervoor beschreven randvoorwaarde niet voor alle metingen exact hetzelfde is geweest.

3. Conclusies uit de meetresultaten

Van de hierna volgende aspecten zal worden aangegeven wat de gevoeligheid ervan op het grondwaterstromingsbeeld (met name op de potentiaalverdeling onder de gesloten bekleding en freatische lijn in het dijklichaam) in het door Berkhout uitgevoerde onderzoek is.

- I. variatie in dikte [D] van het watervoerend pakket.
- II. variatie in strandhoogte.
- III. variatie in daalsnelheid van de buitenwaterstand na de stormvloedtop.
- IV. aanwezigheid van een damwand in de teen.
- V. aanwezigheid van een asfaltslab voor de teen.
- VI. invloed van de doorlatendheid op de maximale overdrukken (algemeen) als functie van de afstand uit de teen.

Voor de overzichtelijkheid is een aantal meetresultaten in tabelvorm samengevat.



Figuur 2: overzicht van de meetpunten

In figuur 2 zijn de plaatsen aangegeven waarop de navolgende beschouwing van de meetresultaten betrekking heeft. Gekozen is voor verdere analyse van het verloop van de waterstanden in meetpunt 1

(I: $x=0,20$ m) nabij de teen, meetpunt 7 (II: $x=9$ m) iets boven het niveau van HW op de bekleding (NAP + 2,00 m) en de meetpunten 13 ($x=21$ m) en 15 ($x=26$ m) ongeveer overeenkomend met het niveau waar de maximale golfaanval op de bekleding te verwachten is (III). Tussen de plaatsen I en II zullen de overdrukken bepalend zijn voor het dijkontwerp. Tussen de plaatsen II en III zijn geen overdrukken meer te verwachten. Hier is van belang het verloop en de ligging van de freatische lijn te kennen i.v.m. golfklappen. Aan de hand van de in tabelvorm gegeven meetresultaten zal getracht worden het effect van de verschillende parameters, zoals die in het systematisch onderzoek zijn gevarieerd, op de overdrukken in de zone I-II en op de waterstanden in de zone II-III aan te geven. Alle gebruikte gegevens omtrent waterstanden en overdrukken zijn ontleend aan de meetresultaten van het systematisch onderzoek van Berkhout (S-83.003).

3.1. Variatie in dikte van het watervoerend pakket

De invloed van de dikte (D) van het watervoerend pakket op de overdrukken en waterstanden in het dijklichaam valt af te leiden uit de meetresultaten van de metingen 2, 3, 4.1, 5.1 en 6.1 van het systematisch onderzoek van Berkhout. In de navolgende tabellen zijn de waterstanden gegeven voor de meetpunten I, II en III op tijdstippen overeenkomend met een buitenwaterstand van NAP + 5,00 m (= ten tijde van de stormvloedtop), een waterstand van NAP + 3,00 m ($\pm 2\frac{1}{2}$ uur na de stormvloedtop) en een waterstand van NAP + 2,00 m ($\pm 3\frac{1}{2}$ uur na de stormvloedtop), waarbij D gevarieerd is ($D = 3, 5, 10, 20, 30$ m).

	$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
B.W.S.= NAP+5,00 m	meet- punt I	meet- punt II	meet- punt III	meet- punt I	meet- punt II	meet- punt III	meet- punt I	meet- punt II	meet- punt III
D=3	2,85	0,90	0,45	3,20	1,45	0,60	3,60	2,25	1,0
5	3,20	1,10	0,50	3,50	1,75	0,75	3,90	2,70	1,30
10	3,40	1,30	0,60	3,60	2,25	1,0	4,0	3,05	1,70
20	3,40	1,35	0,70	3,70	2,40	1,20	4,05	3,20	1,90
30	3,40	1,35	0,70	3,70	2,50	1,25	4,05	3,20	1,95

Tabel 2: waterstanden (t.o.v. NAP) in de meetpunten I, II en III bij verschillende dikten van het watervoerend pakket ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 5,00 m.

	$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
BWS= NAP+3,00 m	I	II	III	I	II	III	I	II	III
D=3	1,95	1,00	0,45	2,25	1,60	0,60	2,50	2,10	1,15
5	2,15	1,25	0,50	2,40	1,90	0,80	2,65	2,35	1,55
10	2,25	1,45	0,60	2,50	2,05	1,10	2,75	2,60	1,95
20	2,25	1,55	0,70	2,55	2,25	1,40	2,75	2,60	2,15
30	2,25	1,55	0,75	2,55	2,25	1,45	2,75	2,60	2,15

Tabel 3: waterstanden (t.o.v. NAP) in de meetpunten I, II en III bij verschillende dikten van het watervoerend pakket ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 3,00 m.

BWS= NAP+2,00 m	$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
D=3	1,50	1,00	0,45	1,70	1,50	0,65	1,90	1,95	1,20
5	1,60	1,25	0,50	1,80	1,80	1,15	2,00	2,10	1,60
10	1,65	1,40	0,60	1,80	1,90	1,40	2,05	2,20	1,95
20	1,70	1,55	0,75	1,85	1,90	1,40	2,05	2,20	2,10
30	1,70	1,55	0,75	1,85	1,90	1,45	2,05	2,20	2,10

Tabel 4: waterstanden (t.o.v. NAP) in de meetpunten I, II en III bij verschillende dikten van het watervoerend pakket ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m.

Algemeen kan n.a.v. de meetresultaten uit tabel 2,3 en 4 het volgende worden gesteld.

- Neemt de dikte D van het watervoerend pakket af, dan wordt de respons op de aangenomen buitenrandvoorwaarde lager. Deze invloed op het grondwaterpotentiaalbeeld wordt voor de doorgemeten dijkgeometrie pas groot indien $D < 10$ m.

Er lijkt een tendens aanwezig dat in meetpunten op grotere afstand van de teen de respons gevoeliger is voor variatie in D, terwijl deze gevoeligheid weer kleiner wordt naarmate het tijdsinterval vanaf het tijdstip overeenkomend met de stormvloedtop groter wordt.

Bij toenemende doorlatendheid wordt de respons van de waterstanden groter. Relatief gezien is dit effect het grootst voor plaats III ($x=26$ m), terwijl variatie in D hierop weinig invloed heeft; een tijdsafhankelijk effect valt uit de gegevens niet op te merken.

In de volgende tabel zijn de maximaal optredende overdrukken gegeven voor enkele plaatsen tussen de meetpunten I en II uit figuur 2, als functie van de dikte (D) van het watervoerend pakket en de doorlatendheid van het dijklichaam ($D = 3, 5, 10, 20, 30$ m en $k=3 \cdot 10^{-5}, 1 \cdot 10^{-4}, 3 \cdot 10^{-4}$ m/s).

	$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m
D=3	0,50	0,30	0	0,60	0,45	0,25	0,75	0,65	0,45
5	0,50	0,30	0,05	0,60	0,50	0,30	0,65	0,60	0,50
10	0,50	0,30	0,10	0,60	0,55	0,40	0,60	0,65	0,55
20	0,50	0,35	0,10	0,60	0,55	0,40	0,60	0,65	0,50
30	0,50	0,35	0,15	0,60	0,55	0,40	0,60	0,65	0,50

Tabel 5: maximale overdrukken Δh (m) op de plaatsen x=0,20 m, x=2,5 m en x=4,5 m als functie van D en K.

Algemeen kan n.a.v. de meetresultaten uit tabel 5 het volgende worden opgemerkt:

- Neemt de dikte van het watervoerend pakket af, dan neemt de maximale overdruk vlakbij de teen toe (x=0,20 m). Deze tendens is in de tabel alleen voor $k=3 \cdot 10^{-4}$ zichtbaar; voor x=2,5 m blijft deze constant en voor x=4,5 m neemt deze overdruk af.

Opvallend is dat bij kleinere doorlatendheden de overdrukken wel lager worden maar dat variatie in D hierop weinig (of geen) invloed meer heeft.

3.2. Variatie in strandhoogte

De invloed van de strandhoogte op de overdrukken en waterstanden in het dijklichaam valt af te leiden uit de metingen 4.1 en 4.3 respectievelijk 5.1 en 5.3. In de navolgende tabellen zijn de waterstanden gegeven voor de plaatsen I, II en III^a op tijdstippen zoals omschreven in 3.1.

		k=3.10 ⁻⁵			k=1.10 ⁻⁴			k=3.10 ⁻⁴		
BWS= NAP + 5,00 m		I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
s.h.= NAP	D=10	3,40	1,30	0,70	3,65	2,30	0,95	4,90	3,05	2,00
	D=5	3,20	1,10	0,55	3,50	1,75	1,20	3,90	2,70	1,60
s.h.= NAP + 1,00 m	D=10	3,55	1,60	1,05	3,75	2,50	1,45	4,10	3,20	2,00
	D=5	3,45	1,50	0,95	3,65	2,20	1,25	3,95	2,85	1,75

Tabel 6: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III^a
bij de strandhoogte op respectievelijk NAP en NAP + 1,00 m
ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 5,00 m.

		k=3.10 ⁻⁵			k=1.10 ⁻⁴			k=3.10 ⁻⁴		
BWS= NAP + 3,00 m		I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
s.h.= NAP	D=10	2,30	1,45	0,75	2,50	2,10	1,40	2,75	2,60	2,20
	D=5	2,15	1,25	0,60	2,40	1,90	1,05	2,65	2,35	1,80
s.h.= NAP + 1,00 m	D=10	2,40	1,75	1,10	2,60	2,25	1,60	2,75	2,60	2,25
	D=5	2,30	1,60	1,00	2,50	2,05	1,35	2,70	2,40	1,95

Tabel 7: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III^a
bij een strandhoogte op respectievelijk NAP en NAP + 1,00 m
ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 3,00 m.

		$k = 3 \cdot 10^{-5}$			$k = 1 \cdot 10^{-4}$			$k = 3 \cdot 10^{-4}$		
BWS= NAP + 2,00 m		I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
s.h.= NAP	D = 10	1,65	1,45	0,75	1,90	1,90	1,40	2,10	2,20	2,15
	D = 5	1,60	1,25	0,60	1,85	1,80	1,05	2,00	2,10	1,80
s.h.= NAP + 1,00 m	D = 10	1,80	1,75	1,10	1,95	2,00	1,60	2,10	2,25	2,15
	D = 5	1,75	1,60	1,00	1,90	1,90	1,35	2,05	2,15	1,90

Tabel 8: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III^a bij een strandhoogte op respectievelijk NAP en NAP + 1,00 m ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m.

Algemeen kunnen de meetresultaten uit de tabellen 6, 7 en 8 als volgt worden geïnterpreteerd:

- Een verhoging van het strandhoogteniveau heeft als effect dat de optredende stijghoogten (iets) toenemen. Het wordt echter pas merkbaar bij lagere k-waarden. Het genoemde effect neemt af naarmate het tijdsinterval na de stormvloedtop groter wordt en is nauwelijks merkbaar voor plaatsen vlakbij de teen.

In tabel 9 zijn de maximaal optredende overdrukken gegeven voor enkele plaatsen tussen de meetpunten I en II uit figuur 1 als functie van de strandhoogte (s.h.) en de doorlatendheid van het dijklichaam (s.h. = NAP en NAP + 1,00 m; $k=3 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$ en $3 \cdot 10^{-4}$ m/s).

		$k=3 \cdot 10^{-5}$ m/s			$k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s			$k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s		
		x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m
s.h.=	D=10	0,50	0,30	0,10	0,60	0,55	0,40	0,60	0,65	0,55
NAP	D=5	0,50	0,30	0,05	0,60	0,50	0,30	0,65	0,60	0,50
s.h.=	D=10	0,20	0,25	0,25	0,30	0,40	0,45	0,40	0,50	0,50
NAP + 1,00 m	D=5	0,15	0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50

Tabel 9: maximale overdrukken Δh (m) op de plaatsen $x=0,20$ m, $x=2,5$ m en $x=4,5$ m als functie van s.h. en k.

De meetresultaten uit tabel 9 kunnen als volgt worden geïnterpreteerd:

- Een verhoging van het strandhoogteniveau heeft een forse daling van de maximaal optredende overdrukken in meetpunten nabij de teen tot gevolg. Dit wordt veroorzaakt doordat de buitenrandvoorwaarde nu niet meer beneden een niveau van NAP + 1,00 m (=s.h.) zakt, waarbij opgemerkt kan worden dat het strandniveau de bekleding "snijdt" op een afstand van $x=\pm 4$ m uit de teen. Hierdoor blijft voor $0 < x < 4$ m altijd een "bovendruk" op de bekleding aanwezig. Voor meetpunten verder van de teen verwijderd, wordt dit effect steeds minder. Voor meetpunten waarvoor geldt dat $x > 3 \text{ à } 4$ m tot het punt waar geen overdrukken meer optreden geldt, dat de maximaal optredende overdrukken zelfs toenemen bij een hoger wordende strandhoogte. Dit laatste effect wordt groter naarmate de k-waarde afneemt.

3.3. Variatie in daalsnelheid van de windopzet

De invloed van de daalsnelheid van de buitenwaterstand na de stormvloedtop op de overdrukken en waterstanden in het dijklichaam is nagegaan m.b.v. de metingen 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6.1 en 6.2.

In de navolgende tabel zijn de waterstanden gegeven voor de plaatsen I, II en III op het tijdstip overeenkomend met een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m.

		k=3.10 ⁻⁵			k=1.10 ⁻⁴			k=3.10 ⁻⁴			
		BWS= NAP + 2,00 m	I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
d.s.= 28,2 cm/uur	D=10	1,65	1,45	0,75	1,85	1,90	1,40	2,10	2,20	2,15	
	5	1,60	1,25	0,60	1,85	1,80	1,00	2,00	2,10	1,80	
	3	1,50	1,00	0,50	1,70	1,50	0,80	1,95	1,95	1,45	
d.s.= 14,1 cm/uur	D=10	1,65	1,45	0,80	1,90	1,95	1,45	2,10	2,20	2,15	
	5	1,60	1,20	0,55	1,80	1,80	1,05	2,00	2,05	1,80	
	3	1,50	1,05	0,50	1,70	1,55	0,80	1,90	1,90	1,45	

Tabel 10: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III^a
bij een daalsnelheid van respectievelijk 28,2 cm/uur en
14,1 cm/uur ten tijde van een buitenwaterstand van
NAP + 2,00 m.

Een verlaging van de daalsnelheid van 28,2 naar 14,1 cm/uur heeft geen noemenswaardig effect op de optredende waterstanden in het dijklichaam.

Er is daarom volstaan met het geven van de meetresultaten op het tijdstip overeenkomend met een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m. Voor de overige tijdstippen blijkt de verlaging in d.s. ook geen effect op de waterstanden te hebben zodat voor deze waarden verwezen kan worden naar de meetresultaten van 3.1.

In tabel 11 zijn de maximaal optredende overdrukken als functie van de daalsnelheid en de doorlatendheid gegeven.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
		x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m
d.s.= 28,2 cm/uur	D=5	0,50	0,30	0,05	0,60	0,50	0,30	0,65	0,60	0,50
	D=3	0,50	0,30	0	0,60	0,45	0,25	0,75	0,65	0,45
d.s.= 14,1 cm/uur	D=5	0,50	0,35	0,05	0,60	0,45	0,20	0,60	0,55	0,35
	D=3	0,50	0,30	-	0,60	0,45	0,25	0,65	0,60	0,40

Tabel 11: maximale overdruk Δh (m) op de plaatsen $x=0,20$ m, $x=2,5$ m en $x = 4,5$ m als functie van ds en k.

- De verlaging van de daalsnelheid heeft weinig effect op de optredende maximale overdrukken. Er is een tendens aanwezig dat voor hogere k-waarden van het zand en voor meetpunten verder van de teen verwijderd, de overdrukken afnemen als gevolg van een lagere daalsnelheid.

3.4. De invloed van een damwand in de teen

De invloed op de waterstanden in het dijklichaam van een damwand in de teenconstructie valt af te leiden uit de meetresultaten van de metingen 1 en 2 uit het systematisch onderzoek van Berkhout. Helaas zijn alleen gegevens voor een dikte van het waterwerend pakket van 30 m beschikbaar. In de onderstaande tabellen zijn de waterstanden gegeven voor de plaatsen I, II en III op tijdstippen zoals omschreven in 3.1.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	BWS= NAP + 5,00 m	I	II	III	I	II	III	I	II	III
d=0 m	D=30	4,15	1,45	0,75	4,30	2,55	1,20	4,50	3,35	2,00
d=2 m	D=30	3,40	1,35	0,70	3,70	2,50	1,25	4,05	3,20	1,95

Tabel 12: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III
bij een damwandlengte van respectievelijk d=0 en d=2 m
ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 5,00 m.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	BWS= NAP + 3,00 m	I	II	III	I	II	III	I	II	III
d=0	D=30	2,65	1,60	0,80	2,85	2,20	1,45	2,90	2,60	2,30
d=2	D=30	2,25	1,55	0,75	2,55	2,25	1,45	2,75	2,55	2,15

Tabel 13: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III
bij een damwandlengte van d=0 en d=2 m ten tijde van een
buitenwaterstand van NAP + 3,00 m.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
BWS= NAP + 2,00 m		I	II	III	I	II	III	I	II	III
d=0 m	D=30	1,85	1,60	0,80	1,95	2,00	1,50	2,10	2,25	2,20
d=2 m	D=30	1,65	1,50	0,75	1,90	1,95	1,45	2,10	2,20	2,10

Tabel 14: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III bij een damwandlengte van d=0 en d=2 m ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m.

Algemeen kan uit de gegevens in de tabellen 9, 10 en 11 het volgende worden opgemerkt:

- Een damwand in de teenconstructie heeft als effect dat de waterstanden op korte afstand van het damwandscherm fors reduceren. Dit effect wordt kleiner voor plaatsen verder van de teen verwijderd, voor hogere doorlatendheden en naarmate het tijdsinterval na de stormvloedtop groter wordt. De invloed van het tijdsinterval na de stormvloedtop is alleen zichtbaar in de grafieken voor meetpunt I.

In tabel 15 zijn de maximaal optredende overdrukken gegeven voor enkele plaatsen tussen de meetpunten I en II als functie van de damwandlengte (d) en de doorlatendheid (k) (d=0 en 2 m; $k=3 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$ en $3 \cdot 10^{-4}$ m/s).

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=1 \cdot 10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
		x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m
d=0 m	D=30	0,30	0,30	0,15	0,35	0,50	0,40	0,35	0,50	0,50
d=2 m	D=30	0,50	0,35	0,15	0,60	0,55	0,40	0,60	0,65	0,50

Tabel 15: maximale overdruk Δh (m) op de plaatsen $x=0,20$ m; $x=2,5$ m en $x=4,5$ m als functie van d en k.

- De damwand heeft als effect dat de overdrukken nabij de teen hoger worden. Voor plaatsen op grotere afstand van de teen valt dit effect weg. Variatie in doorlatendheid heeft hierop weinig of geen invloed.

3.5. De invloed van een asfaltslab voor de teen

De invloed op de waterstanden in het dijklichaam van een asfaltslab voor de teen is nagegaan m.b.v. de metingen 6 en 6.3.

In de navolgende tabellen zijn de waterstanden gegeven voor de plaatsen I, II en III^a op tijdstippen zoals omschreven in 3.1.

		$k=3.10^{-5}$			$k=1.10^{-4}$			$k=3.10^{-4}$		
BWS= NAP + 5,00 m		I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
1.a.s. =0 m	D=3	2,85	0,90	0,50	3,20	1,45	0,75	3,60	2,25	1,25
1.a.s. =5 m	D=3	2,30	0,75	0,40	2,65	1,25	0,70	3,00	1,80	1,05

Tabel 16: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III (buitenwaterstand is NAP + 5,00 m); lengte asfaltslab (1.a.s.) = 0 en 5 m.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	BWS= NAP + 3,00 m	I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
l.a.s. =0 m	D=3	1,95	1,00	0,50	2,25	1,60	0,80	2,50	2,10	1,45
l.a.s. =5 m	D=3	1,65	0,80	0,40	1,95	1,35	0,75	2,25	1,80	1,20

Tabel 17: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III bij een damwandlengte van respectievelijk d=0 en d=2 m ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 3,00 m.

		$k=3 \cdot 10^{-5}$			$k=10^{-4}$			$k=3 \cdot 10^{-4}$		
	BWS= NAP +	I	II	III ^a	I	II	III ^a	I	II	III ^a
l.a.s. =0	D=3	1,50	1,00	0,50	1,70	1,50	0,75	1,95	1,95	1,45
l.a.s. =5 m	D=3	1,30	0,80	0,40	1,55	1,35	0,75	1,80	1,70	1,25

Tabel 18: waterstanden (t.o.v. NAP) op de plaatsen I, II en III bij een damwandlengte van respectievelijk d=0 en d=2 m ten tijde van een buitenwaterstand van NAP + 2,00 m.

Algemeen kan uit de gegevens in de tabellen 16, 17 en 18 het volgende worden opgemerkt:

- Een asfaltslab (hier l.a.s. = 5 m) voor de teen heeft als effect dat de waterstanden op korte afstand van de teen lager worden. Het effect neemt af voor plaatsen verder van de teen verwijderd en naarmate het tijdsinterval na de stormvloedtop groter wordt.

Variatie in doorlatendheid lijkt hierop van weinig invloed.

In tabel 19 zijn de maximaal optredende overdrukken gegeven voor enkele plaatsen tussen de meetpunten I en II als functie van de lengte van de asfaltslab (l.a.s.) en de doorlatendheid ($k=3.10^{-5}$, $k=1.10^{-4}$ en $k=3.10^{-4}$ m/s).

		$k=3.10^{-5}$			$k=1.10^{-4}$			$k=3.10^{-4}$		
		x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m	x=0,20 m	x=2,5 m	x=4,5 m
l.a.s. = 0	D=3	0,50	0,35	0	0,60	0,45	0,25	0,75	0,65	0,45
l.a.s. = 5 m	D=3	0,55	0,30	-	0,70	0,45	0,05	0,80	0,65	0,35

Tabel 19: maximale overdruk Δh (m) op de plaatsen $x=0,20$ m; $x=2,5$ m en $x=4,5$ m als functie van lengte asfaltslab (l.a.s.) en doorlatendheid k .

- Een asfaltslab voor de teen (hier l.a.s. = 5 m) heeft als effect dat de overdrukken vlakbij de teen (iets) toenemen. Voor plaatsen onder de bekleding verder van de teen ($x > \pm 2,0$ m) nemen de maximale overdrukken echter af als gevolg van de asfaltslab.

Het effect is echter niet groot en opgemerkt dient te worden dat de getoonde verschillen uit tabel 19 mogelijk een gevolg van een beperkte (onbekende) meetnauwkeurigheid kunnen zijn. Verder betreft het hier een geval van asfaltslab en damwand zodat de conclusies voor het geval zonder damwand af kunnen wijken.

3.6. De plaats van het maximum van de maximaal optredende overdruk onder de bekleding als functie van de doorlatendheid

Bij de meetresultaten van het systematisch onderzoek (nr. S-83.003) is in grafiekvorm van alle metingen het verband uitgezet tussen de

maximaal optredende overdruk Δh als functie van de doorlatendheid k . Dit is gedaan voor een aantal plaatsen tussen de meetpunten I en II uit figuur 2.

Tevens zijn grafieken gemaakt waarin de maximale overdruk Δh is uitgezet als functie van de afstand uit de teen.

Dit laatste is gedaan voor doorlatendheden van het dijklichaam van respectievelijk $k=3 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-4}$ en $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Als voorbeeld zijn voor meting 2 uit het systematisch analogon-onderzoek de overdruk als functie van de doorlatendheid (zie bijlage 2) en de overdruk als functie van de afstand uit de teen (zie bijlage 3) bij dit verslag gevoegd. Voor de rest van deze grafieken wordt verwezen naar de meetresultaten van het analogon-onderzoek.

Uit deze meetresultaten valt algemeen het volgende op te merken.

- Variatie in dikte (D) van het watervoerend pakket heeft tot gevolg dat bij afnemende D de plaats waar het maximum van de maximale overdruk optreedt dichterbij de teen komt te liggen. Bij grote D 's ligt de plaats van dit maximum op ± 2 m van de teen verwijderd. Tussen deze plaats en de teen nemen de overdrukken iets af in de richting van de teen.

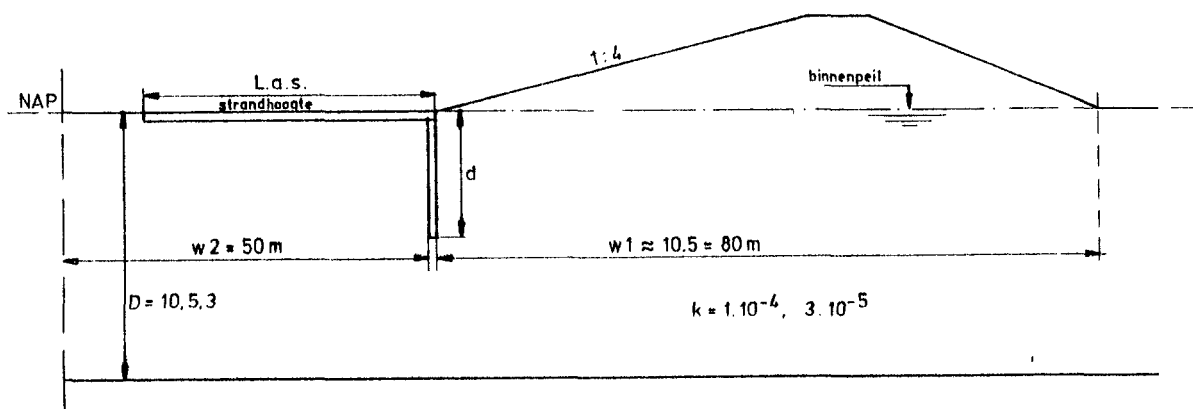
Variatie in doorlatendheid heeft op deze kleine afname in overdruk weinig effect (zie b.v. bijlage 3).

Voor plaatsen op grotere afstand van de teen dan de plaats van het maximum, neemt de overdruk snel af. Variatie in doorlatendheid heeft een toenemend effect op deze overdrukken naarmate de afstand groter wordt. Algemeen blijft gelden (zie lit. 2) dat voor de grootte van de optredende overdrukken er een meest "ongunstige" doorlatendheid bestaat waarvoor (afhankelijk van de afstand x vanaf de teen) deze overdrukken een maximum bereiken (zie b.v. bijlage 2).

4. Vervolgonderzoek

Uit de tot nu toe geanalyseerde meetresultaten zijn conclusies m.b.t. een groot aantal factoren, die de respons in een dijklichaam met gesloten bekleding t.g.v. een opgelegde randvoorwaarde bepalen, gehaald. In deze paragraaf wordt getracht aan te geven welke aspecten nog nader onderzocht kunnen worden. Hierbij kan gedacht worden aan zowel onderzoek met Teledeltospapier en Elnag als met een mathematisch model zoals het in hfst. 1 genoemde programma GROFLOD.

1: testmetingen of -berekeningen ter vergelijking van meetresultaten uit tot nu toe uitgevoerde analogon-metingen.



parameters berekening nr.	D [m]	d [m]	s.h. = strand- hoogte [m+NAP]	d.s. = daalsnel- heid [cm/uur]	b.p. = binnen- peil [m+NAP]	L.a.s. = lengte asfalts lab [m]
1.1. (meting 1)	30	0	0	± 28	0	0
1.2. (meting 2)	30	2	0	± 28	0	0
1.3. (meting 4 ¹)	10	2	0	± 28	0	0
1.4. (meting 5 ¹)	5	2	0	± 28	0	0
1.5. (meting 6 ¹)	3	2	0	± 28	0	0
1.6. (meting 6 ³)	3	2	0	± 28	0	5
	vertikale doorl.heid k_z	horizonta- le d.l.h. k_x	porosi- teit n	talud- helling	w1	w2
alle bereke- ningen x3	$3 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-5}$	0,3 0,3 0,3	1:4 1:4 1:4	80 80 80	50 50 50

2: Invloed asfaltslab.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s
2.1	10	0	0	28	0	5
2.2	10	2	0	28	0	5
2.3	10	2	0	28	0	10
2.4	10	2	0	28	0	15
	vert. d.l.h.	hor. d.l.h.	por.	tal. hell.	w1	w2
alle ber. x3	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,3	1:4	80	50
	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,3	1:4	80	50
	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,3	1:4	80	50

3: Invloed damwandlengte.

	D	d*	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
3.1	10	0,50	0	28	0	0
3.2	10	1,0	0	28	0	0
3.3	10	1,5	0	28	0	0
3.4	10	2,0	0	28	0	0
3.5	10	2,5	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
alle ber. x3	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,3	1:4	80	50
	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,3	1:4	80	50
	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,3	1:4	80	50

4: Invloed anisotropie.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
4.1	10	2	0	28	0	0
4.2	5	2	0	28	0	0
4.3	3	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
alle	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	0,3	1:4	80	50
ber. x3	$1 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	0,3	1:4	80	50
	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	0,3	1:4	80	50

5: Invloed taludhelling.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
5.1	10	2	0	28	0	0
5.2	5	2	0	28	0	0
5.3	3	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	x	n	w1	w2
alle	10^{-4}	10^{-4}	1:3	0,3	80	50
ber. x4	10^{-4}	10^{-4}	1:5	0,3	80	50
	10^{-4}	10^{-4}	1:8*	0,3	80	50

6: Invloed porositeit.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
6.1	10	2	0	28	0	0
6.2	5	2	0	28	0	0
6.3	3	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
alle	10^{-4}	10^{-4}	0,2	1:4	80	50
ber. x4	10^{-4}	10^{-4}	0,25	1:4	80	50
	10^{-4}	10^{-4}	0,35	1:4	80	50
	10^{-4}	10^{-4}	0,4	1:4	80	50
			0,45	1:4	80	50

7: Invloed binnenpeil.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
7.1	10	2	0	28	-1	0
7.2	10	2	0	28	1	0
7.3	10	2	0	28	2	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
alle ber.	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	80	50

8: Invloed dijkbreedte.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
8.1	10	2	0	28	0	0
8.2	5	2	0	28	0	0
8.3	3	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
alle	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	50	50
ber.	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	75	50
x3	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	100	50

9: Invloed mijnsteenkade.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
9.1	10	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	80	50

De voorgestelde geometrie doorrekenen voor alle drie mogelijk in te voeren mijnsteenkaden.

Varieer de doorlatendheid van de mijnsteenkade b.v.:

$k_{\text{mijnsteen}} = 1 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-5}, 1 \cdot 10^{-6}$.

10: Invloed ventielconstructie.

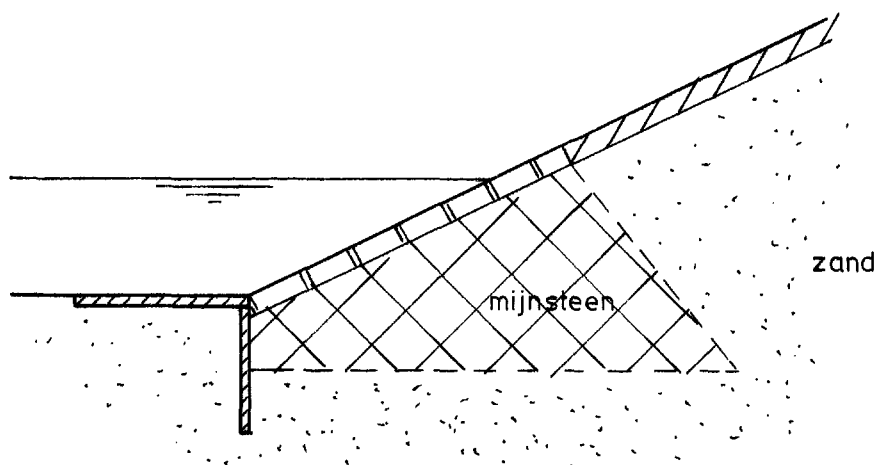
	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
10.1	10	2	0	28	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
ber. x3	10^{-3}	10^{-3}	0,3	1:4	80	50
	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	80	50
	10^{-5}	10^{-5}	0,3	1:4	80	50

11: Invloed daalsnelheid.

	D	d	s.h.	d.s.	b.p.	l.a.s.
11.1	10	2	0	± 24	0	0
11.2	10	2	0	± 42	0	0
11.3	10	2	0	± 56	0	0
	k_z	k_x	n	x	w1	w2
	10^{-4}	10^{-4}	0,3	1:4	80	50

4.1. Vervolgonderzoek naar andere modelschematiseringen

4.1.1. Dijklichaam met gedeeltelijk open-, gedeeltelijk dichte bekleding

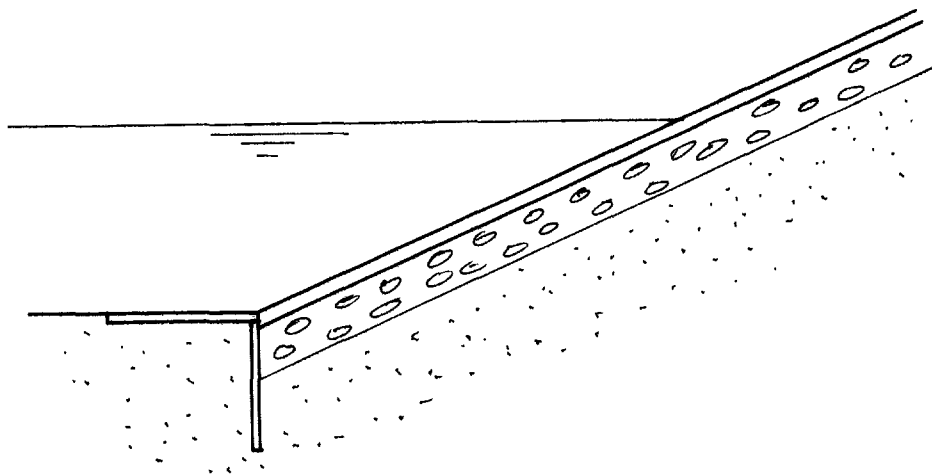


- Geprobeerd kan worden het rekenprogramma GROFLOD aan te passen voor dit geval.
- Mogelijkheden op elektrische analogons?
- Nieuw numeriek model ontwikkelen?

4.1.2. Dijklichaam met geheel open bekleding

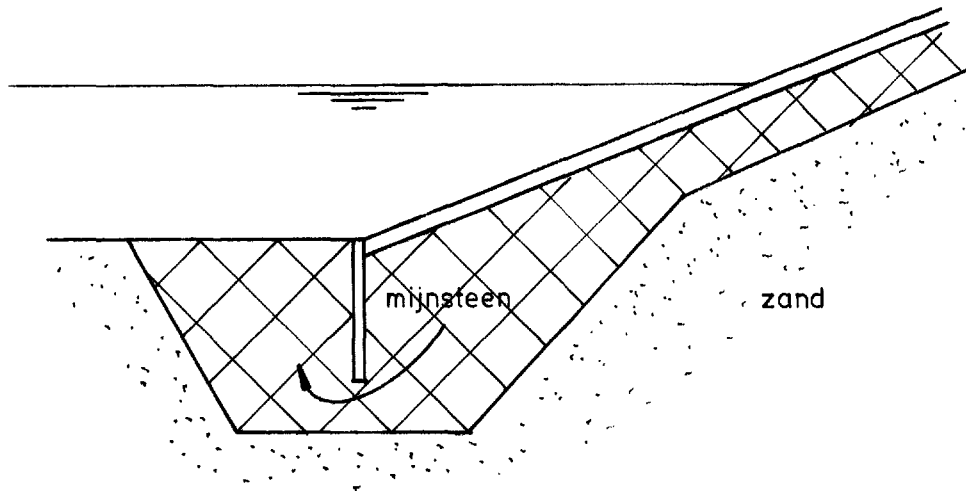
- Opmerkingen gelijk 4.2.1.

4.1.3. Gesloten (en/of open-) bekleding op doorlatende laag



- Mogelijkheden op elektrische analogons.
- Nieuw numeriek model ontwikkelen.

4.1.4. Doorlatende teenconstructie



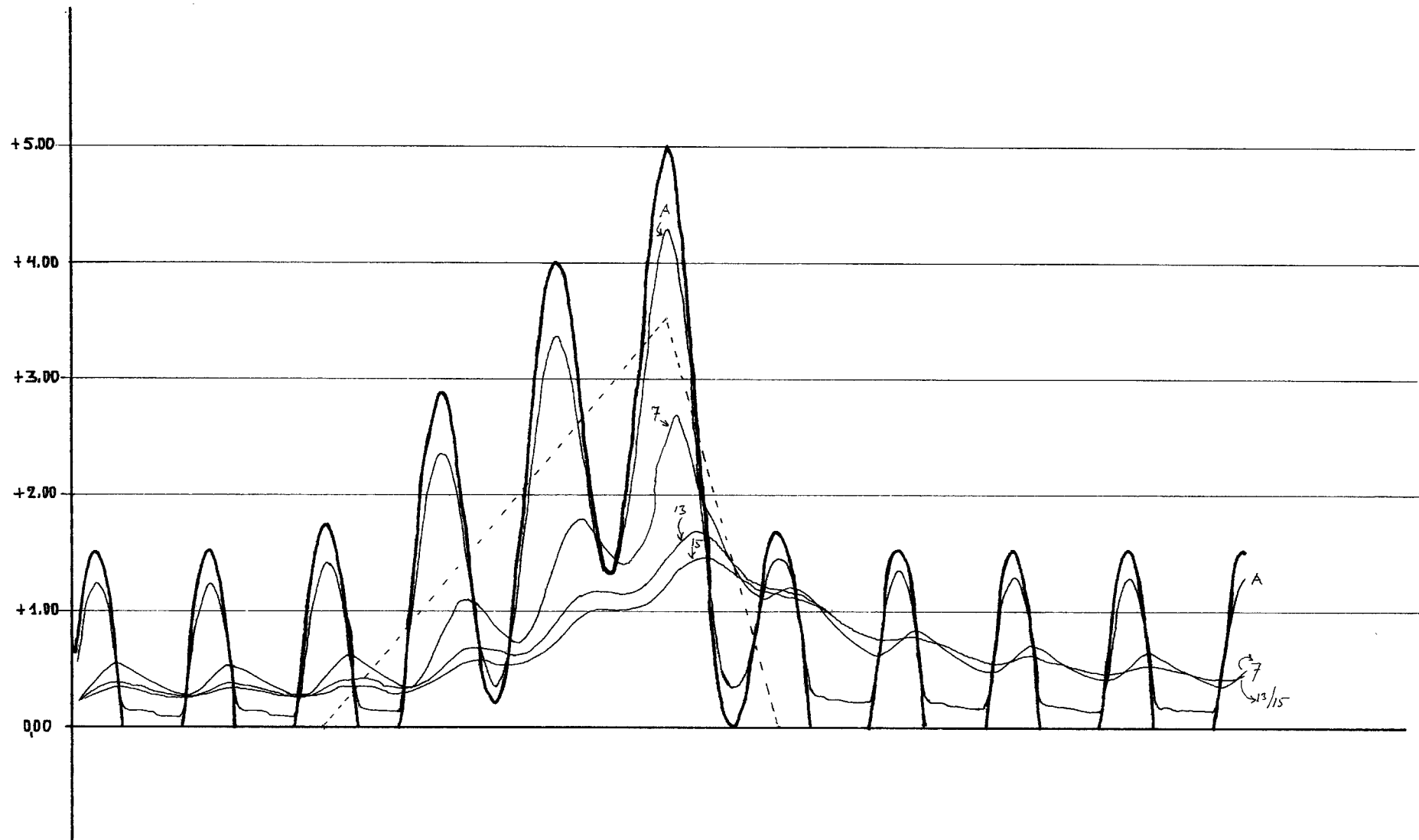
- Mogelijkheden op elektrische analogons.
- Nieuw numeriek model.

4.1.5. Dijklichaam bestaande uit meerdere grondsoorten (zand, klei, mijnsteen etc.).

- Nieuw numeriek model ontwikkelen.

Literatuur

- [1] "Peilbuiswaarnemingen Brouwersdam in de periode november 1979-november 1981" - COW rapport S-71.066.
- [2] "Voortplanting van een extreme stormvloed in een dijklichaam met gesloten bekleding" - COW notitie 82-10.
- [3] Gebruikershandleiding GROFLOD - Afstudeerscriptie TH-Delft - J. Talens, december 1982.



CO_W

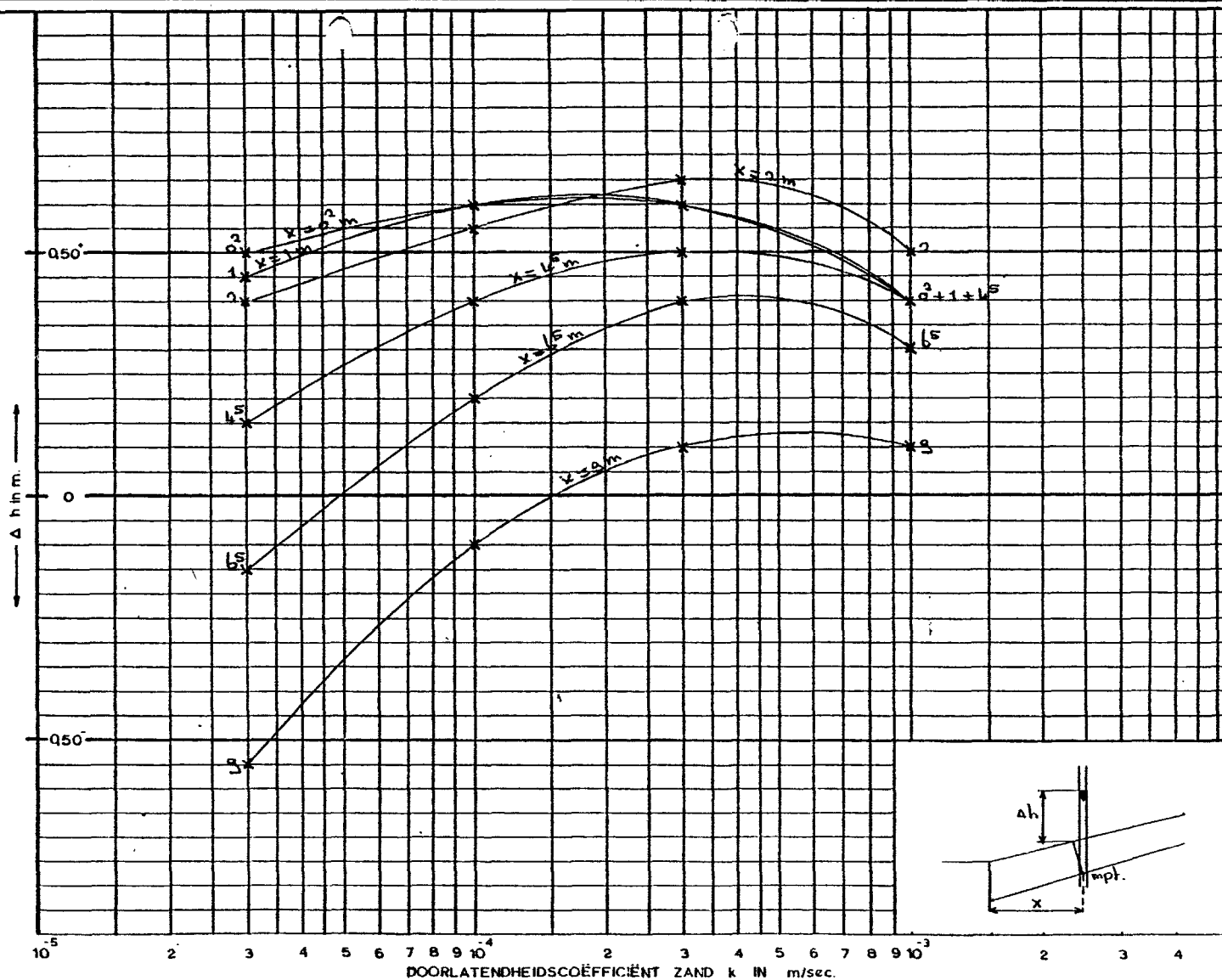
Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

stijghoogterespons in de tijd op de aangehouden
buitenrandvoorwaarde voor de plaatsen $x=20$
(mtpnt A), $x=4$ (mtpnt 7), $x=21$ (mtpnt 13) en
 $x=26$ (mtpnt 15) voor meting 1

get	gew	gez	schaal	bijlage 1
<i>get</i>				
			werknr	tek nr A4-

rijkswaterstaat
deltsdienst - hoofdafdeling wateropkunde

tekstnr. accoord projectcode



CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

k-waarde grafiek van maximale Δh 's
voor meting 2

get gew gez

schaal

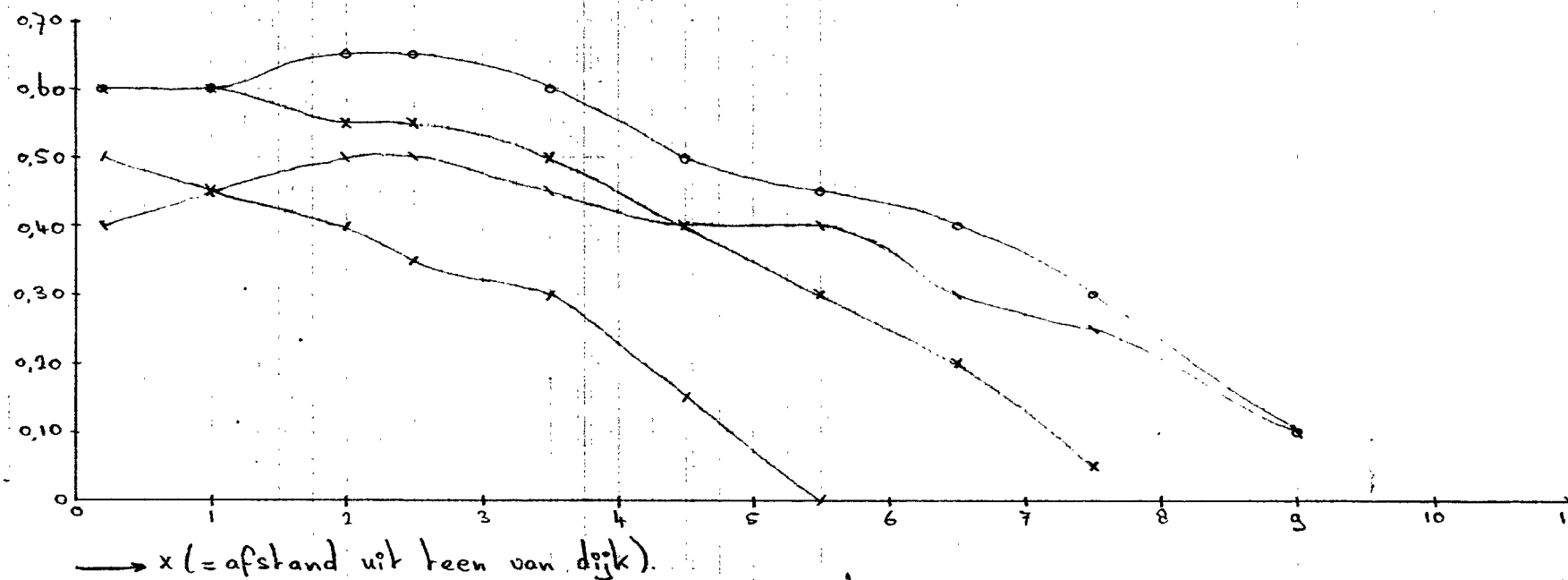
bijlage 2

werknr

tek nr A4-

/	/	/	/	3×10^{-5}	m/s
x	v	x	x	10^{-4}	m/s
o	o	o	o	3×10^{-4}	m/s
\	\	\	\	10^{-3}	m/s

→ Δh in m. t.o.v. bovenkant bekleding.



→ x (= afstand uit keel van dijk).

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

omhullenden van max. overdrukken (Δh 's)
voor meting 2

get	gew	gez	schaal	bijlage 3
			werknr	tek nr A4-

SYSTEMATISCH ONDERZOEK

GRONDWATERBEWEGING IN DIJKEN

Verslag van: T.Berkhout

Klas: C.T.3

Stageplaats: R.W.S.
Den Haag

Afdeling: C.O.W.

Datum: 1 juli 1982

Inhoudsopgave

	blz.
1. Inleiding	1
2. Grondwaterbeweging in dijken	1
3. Electrisch analogiemodel	3
4. Randvoorwaarden	6
5. Inrichting van het teledeltosmodel	7
6. Uitvoering onderzoek	8
7. Slotwoord	11

1. Inleiding

Al geruime tijd bestond er bij de werkgroep "dijkbekledingen" van het Centrum Onderzoek Waterkeringen (C.O.W.) behoefte aan gegevens over de invloed van de variatie van dijkprofielen en grondparameters op de grondwaterbeweging in dijken. Naar aanleiding hiervan werd besloten om een systematisch onderzoek in te stellen. Dit onderzoek is door mij uitgevoerd waarbij de benodigde apparatuur geleverd is door de Deltadienst te Rijswijk.

Doel van het onderzoek is om te bepalen welke randvoorwaarden en parameters belangrijk zijn voor de dimensionering van bekledingen van dijken. Tevens kan genoemd worden de mogelijkheid tot globale classificatie van bestaande en toekomstige dijken naar orde van grootte van te verwachten overdrukken en naar de (maximale) hoogte van de freatische lijn in de dijk. Dit laatste is van belang voor het onderzoek naar de effecten van golfklappen op de bekleding.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van een electrisch analogiemodel. De werking van dit model berust op de analogie tussen de wet van Darcy voor grondwaterstroming en de wet van Ohm. Het betreft hier een model op schaal waarbij de grondwaterstroming wordt voorgesteld door een electrische stroom.

De uitvoering van dit onderzoek en de verkregen resultaten worden in dit verslag behandeld. De werking van het model en het principe waarop de analogie berust komen hierbij uitgebreid aan de orde.

2. Grondwaterbeweging in dijken

In de grond wordt op zekere diepte water aangetroffen, dat, afhankelijk van de waterstanden in de omgeving, in beweging of in rust is. Is het water in beweging, dan stroomt het van een punt met een hogere waterstand naar een punt met een lagere waterstand. De stroomsnelheid is dan afhankelijk van de doorlatendheid van de grondsoort, waar het water doorheenstroomt en is lineair afhankelijk van het verhang waartussen de stroming plaatsvindt. In de "filterwet van Darcy" wordt het bovenstaande aangaande de grondwaterbeweging in een formule uitgedrukt:

$v = kI$, waarin "v" de stroomsnelheid in m/s is, "k" de doorlatendheidscoëfficiënt van de grond in m/s, en "I" het verhang in m/m' is.

Uit het voorgaande volgt, dat de hoogte van de freatische lijn in een dijk vaak zal verschillen, omdat de waterstand van het door de dijk te

keren water veelal niet constant is. Dit laatste is natuurlijk met name het geval bij zeedijken, waar de buitenwaterstand onderhevig is aan eb en vloed en mede bepaald wordt door factoren als windkracht en windrichting.

Op deze zeedijken heeft het systematisch onderzoek betrekking.

Het wisselen van de hoogte van de freatische lijn in de dijk is van belang in verband met het optreden van overdrukken. Deze overdrukken ontstaan indien bij een waterdichte bekleding van het talud van de dijk de waterstand in de dijk op een hoger niveau komt te staan dan de buitenwaterstand. (zie fig.1).

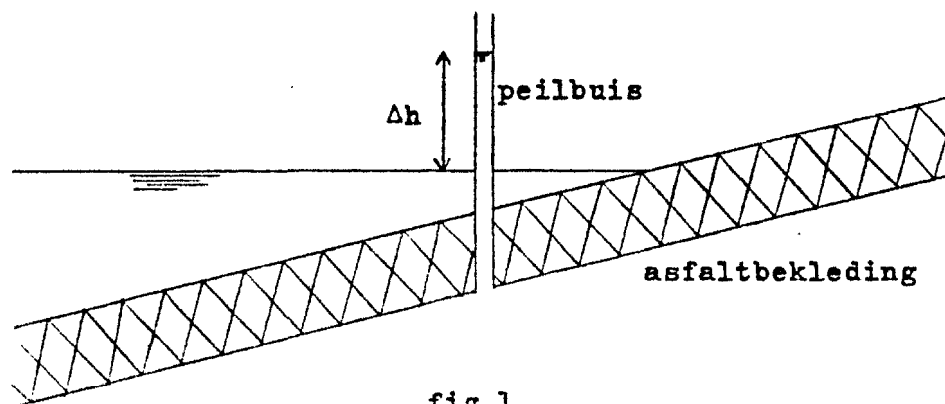


fig.1

Vor allem nach einem Sturmflut wird dieses Ereignis eintreten. Der Binnenwasserstand wird nämlich abhängig von der Grundart mit mehr oder weniger Verzögerung dem Verlauf der Außenwasserstand folgen. Da der Außenwasserstand bei einem Sturmflut sehr hohe Werte erreicht, wird das Wasser in der Dijk auch stark ansteigen. Nachdem die maximale Sturmfluthöhe erreicht ist, wird der Außenwasserstand im allgemeinen jedoch schnell sinken. Diese Senkung wird von der Binnenwasserstand gefolgt mit einer bestimmten Verzögerung, die wiederum abhängig ist von der Grundart. Diese Verzögerung ist meistens so groß, dass es einen Punkt erreicht wird, bei dem der Wasserstand in der Dijk über dem Niveau der Außenwasserstand zu liegen, wodurch es Überdruken entstehen.

Kenntnis von der Lage der freatischen Linie für das Untersuchung nach dem Effekt von Golfklappen auf die Bekleidung ist notwendig, um zu bestimmen, ob das Sand unter der Bekleidung nass oder trocken ist, und zu dem Zeitpunkt, auf dem die Golfklappen erwartet werden. Der Effekt der Golfklappen ist nämlich größtenteils abhängig von dem nass oder trocken sein der Grund unter der Bekleidung.

Aus dem obigen ist es klar, dass das Wissen von der Grundwasserbewegung von großer Bedeutung ist. Um einen Eindruck zu bekommen von der Grundwasserbewegung, stehen uns verschiedene Methoden zur Verfügung. Eine davon ist das Arbeiten mit einem elektrischen Analogiemodell, wie es für das sys-

tematisch onderzoek.

3. Electric analogiemodel

Zoals reeds eerder is gesteld, berust de analogie op de overeenkomst tussen de wet van Darcy voor grondwaterstroming en de wet van Ohm voor elektrische stroom door een geleider. In het model wordt de grondwaterstroming dus vertaald in een elektrische stroom. De weerstand van de geleider stelt hierbij het omgekeerde van de doorlatendheid van de grond voor.

Er bestaan meerdere modellen voor de nabootsing van grondwaterstroming. Eén van die modellen is een teledeltosmodel, zoals ook gebruikt is voor het onderzoek. Het betreft hier een plaatvormige geleider in dit geval bestaande uit teledeltospapier. Dit papier is elektrisch geleidend en heeft een nagenoeg constante weerstand. Het model is geschikt voor het oplossen van twee-dimensionale grondwaterstromingsproblemen. Aangezien we de dijk bij het onderzoek ook twee-dimensionaal bekijken, is zo'n model voor ons werk voldoende. De grondwaterstroming door de dijk wordt in het model geschematiseerd tot een elektrische stroom door een plat vlak. Het dwarsprofiel van de dijk en de plaatvormige geleider zijn hierbij gelijkvormig, waarbij de geleider op schaal gemaakt is.

Daar voor het systematisch onderzoek het doorstroomde grondpakket in de dijk beschouwd zal worden als homogeen en isotroop, hebben we te maken met slechts één weerstand van de grond. Dit is gunstig in verband met het model omdat er geen lagen met verschillende doorlatendheden ingebouwd behoeven te worden. Anisotropie en inhomogeniteiten in de doorlatendheid zijn namelijk in een teledeltosmodel niet erg eenvoudig te realiseren.

De grenzen van het model worden bepaald door de randvoorwaarden. Op deze randvoorwaarden zal in het volgende hoofdstuk worden ingegaan. Allereerst volgen nu de analogiewetten en hun afleidingen.

Nomenclatuur

Hydraulisch:

V = filtersnelheid (in m/sec).

k = doorlatendheidscoëfficiënt van de grond (in m/sec).

H = hoogte (in m).

h_c = hoogte capillaire zone in de grond, indien deze zone in rust is (in m).

Z = hoogte van de bovenzijde van het gesloten grondwater boven een willekeurig gekozen horizontaal vergelijkingsvlak (in m).

z = plaatshoogte van een punt boven een willekeurig gekozen horizontaal vergelijkingsvlak (in m).

p = drukhoogte in een punt (in m water).

$\varphi = z + p$ is potentiaal (in m).

S = langs een stroomlijn gemeten afstand (in m).

A = oppervlakte van een vlakje, loodrecht op de stroomlijnen (in m²).

q = de door oppervlak A stromende hoeveelheid water (in m³/sec).

β = volume percentage van de grond dat door water ingenomen kan worden.

B = afstand tussen twee doorsneden waartussen de twee-dimensionale stroming wordt beschouwd (in m).

t_a = tijd in de natuur (in sec.).

Elektrisch:

- ρ = weerstand tussen twee tegenover elkaar liggende zijden van een kubusvormige geleider met ribben van 1 m (in ohm.m).
 R = weerstand tussen twee tegenoverliggende zijden van een vierkant stukje plaatvormige geleider (in ohm).
 E = spanning (in volt).
 s = langs een geleider gemeten afstand in de stroomrichting (in m).
 h = hoogte (in m).
 a = oppervlakte van een geleider loodrecht op de stroomlijnen (in m²).
 i = de door een oppervlakte a vloeiende stroom (in ampère).
 C = capaciteit van een condensator (in sec/ohm).
 b = dikte van een geleidende plaat (in m).
 t_m = tijd in het model (in sec).

Voor de grondwaterstroming geldt de Wet van Darcy:

$$v = kI = -k \frac{d\phi}{ds} \quad (a) \quad (\text{een "-" teken, daar } d\phi \text{ een verlaging van energiehoogte impliceert})$$

voorts geldt: $v = \frac{q}{A} \quad (b)$

(b) in (a) ingevuld levert : $d\phi = -\frac{1}{k} \times \frac{dS}{A} \times q \quad (1)$

Voor het electrisch model geldt de Wet van Ohm:

$$V = iR, \text{ en } \frac{dV}{ds} = i \times -\frac{\rho}{a}$$

hieruit volgt dat $dV = -\rho \times \frac{ds}{a} \times i \quad (2)$

"Analogie" betekent "overeenkomst" tussen (1) en (2). Hieraan wordt voldaan indien:

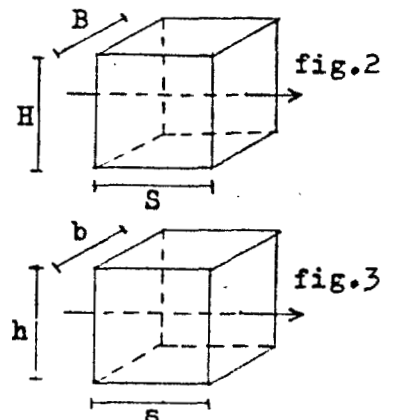
$$\frac{\phi}{V} = \frac{1}{k\rho} \times \frac{S}{s} \times \frac{a}{A} \times \frac{q}{i} \quad (3)$$

Als derhalve k en ρ bekend zijn, alsmede de lengte-, breedte-, en hoogte-verhoudingen tussen het model en het onderzochte profiel in situ, volgt uit de gekozen verhouding $\frac{\phi}{V}$ (de potentiaalschaal), de verhouding $\frac{q}{i}$ (de stroomschaal).

In situ geldt: $A = B \times H$; de stroming staat loodrecht op A (zie in situ schets, figuur 2)
 In het model geldt : $a = b \times h$; de stroming staat loodrecht op a (zie modelschets, fig. 3).

Uit $A = B \times H$ en $a = b \times h$ volgt dat formule (3) over gaat in:

$$(4): \quad \frac{\phi}{V} = \frac{1}{k\rho} \times \frac{S}{s} \times \frac{b \times h}{B \times H} \times \frac{q}{i}$$



Als de hoogteschaal (h:H) gelijk is aan de lengteschaal (s:S), dan vallen deze betrekkingen weg uit formule (4) en ontstaat:

$$\frac{\varphi}{V} = \frac{1}{k\rho} \times \frac{b}{B} \times \frac{q}{i} \quad (5)$$

Uit deze formule volgt dat men vrij is in het kiezen van de schaal, zonder dat dit invloed heeft op potentiaal-, en stroomschaal.

Als plaatvormige geleider wordt Teledeltos-papier toegepast. Omdat de dikte van het geleidende papier niet exact bepaald kan worden bepaalt men bij elk model dat gemaakt wordt de z.g. vierkantsweerstand (vierkant, dus $s=h$, zie figuur 3). Er geldt:

$$R = \frac{s \times \rho}{b \times h}$$

Vanwege de vierkante vorm, met $s=h$, kan gesteld worden: $R_{\square} = \frac{\rho}{b}$, dus $\rho = b \cdot R_{\square}$. Dit geeft in formule (5) :

$$\frac{\varphi}{V} = \frac{1}{kR_{\square}} \times \frac{1}{B} \times \frac{q}{i} \quad (6)$$

In geval van een niet stationaire grondwaterbeweging dient aan het freatisch vlak nog de volgende continuïteitsvergelijking in beschouwing te worden genomen: beschouwen we een oppervlak A van de bewegende vrije grondwaterspiegel met energie-hoogte Z, dan geldt:

$$q = A \times \beta \times \frac{dZ}{dt_n} \quad (7)$$

Is de amplitude van de beweging klein, dan gaat (7) over in :

$$q = A \times \beta \times \frac{d\varphi}{dt_n} \quad (8)$$

Het product " $A \times \beta$ " kan als berging gezien worden. In het electrisch model wordt dit gerepresenteerd door de bergingscapaciteit C van een condensator, waarvoor geldt:

$$i = C \times \frac{dV}{dt_m} \quad (9)$$

Dit is dan de electrische analogie van de in-situ-bergingsformule (8).

Worden nu de formules (5), (8) en (9) in elkaar geschreven, dan ontstaat de formule:

$$\frac{\beta}{C} = k \cdot \rho \times \frac{t_n}{t_m} \times \frac{B}{b} \times \frac{1}{A} \quad (10)$$

Wegens $A = B \times H$ en vanwege het toepassen van Teledeltos-papier, waar-

voor geldt $p_1 = b \times R$, ontstaat de belangrijke formule, waaraan bij het model in het onderzoek moet worden voldaan:

$$\frac{\beta}{C} = k \times R_{\square} \times \frac{t_n}{t_m} \times \frac{1}{H} \quad (11)$$

Indien $H = 1$ meter en $B = 1$ meter worden gesteld, dan is C de capaciteit van de condensator, die analoog is aan 1 strekkende meter van het vrije oppervlak.

Er geldt dan:
$$C = \frac{\beta}{k \cdot R_{\square}} \times \frac{t_m}{t_n} \quad (12)$$

4. Randvoorwaarden

De randvoorwaarden zijn vastgesteld aan de hand van besprekingen die plaatsgevonden hebben met mensen van de Deltadienst en het C.O.W. Zoals reeds gezegd zal het doorstroomde grondpakket in de dijk beschouwd worden als homogeen en isotroop. Het dijklichaam heeft een breedte van 100 m.

De begrenzing aan de onderkant van het model ligt op een diepte D , waar een ondoorlatende laag verondersteld wordt. Aan de zijanten wordt de grens aangenomen op een oneindig grote afstand vanuit de binnenteen respectievelijk buitenteen van de dijk. In verband met de praktische uitvoering van het model wordt deze afstand ter grootte van $2D$ genomen. (zie fig. 4). Uit ervaring is namelijk gebleken dat een afstand van twee maal de diepte van het watervoerende pakket goede resultaten geeft in verband met de nauwkeurigheid van de metingen.

De laagste buitenwaterstand ligt in verband met de strandhoogte op minimaal N.A.P.-hoogte. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit peil bij enkele metingen op N.A.P. + 1,00 m. komt te liggen.

Het buitentalud van de dijk belooft van N.A.P. tot N.A.P. + 2,00 m. 1:4, en voor het gedeelte daarboven 1:6.

De gemiddelde freatisch lijn loopt van N.A.P. + 2,00 m. aan het buitentalud tot N.A.P.-hoogte aan het binnentalud.

Variabele randvoorwaarden zijn verder de lengte van de damwand, welke zich bij de buitenteen van de dijk bevindt, en de doorlatendheidscoëfficiënt k , waarbij laatstgenoemde respectievelijk de waarden 3×10^{-5} , 10^{-4} , 3×10^{-4} en 10^{-3} m/s zal krijgen.

Een tijdsafhankelijke randvoorwaarde is de stormvloed die is aangenomen op een maximum peil van N.A.P. + 5,00 m., met een duur van vier getijden en een daalsnelheid van het windeffect van 30 cm./uur. Deze daalsnelheid zal echter enkele keren verlaagd worden tot 15 cm./uur om het effect hiervan

te bekijken.

De dikte van het asfaltbeton zal 70 cm. bedragen op N.A.P.-hoogte tot 35 cm. op N.A.P.+2,00 m. Hierboven komt asfaltbeton met een dikte van 25 cm. Er is geen berm in het talud opgenomen.

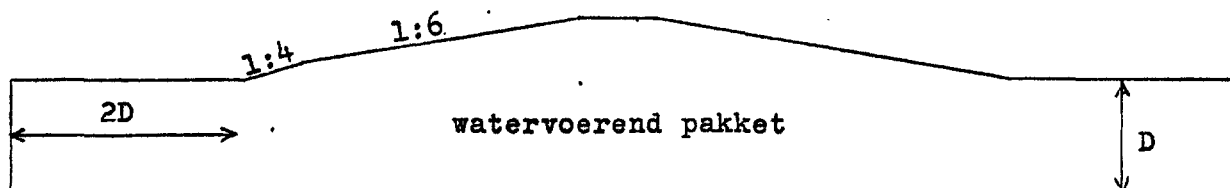


fig.4

5. Inrichting van het teledeltosmodel

Het teledeltospapier waaruit het model vervaardigd wordt is opgebouwd uit twee lagen papier waartussen een zeer dunne laag geleidend koolstofpoeder is aangebracht. De ene kant van het papier is dof grijs en de andere kant is glanzend licht grijs omdat zij met een aluminiumlaag is bedekt. Het papier heeft een zekere inhomogeniteit en anisotropie ten aanzien van de weerstand in de orde van grootte van 5 à 10 %. De vierkantsweerstand van het teledeltospapier wordt bepaald door de weerstanden in beide hoofdrichtingen met behulp van twee vierkante stukjes papier te meten. De vierkantsweerstand is dan $R = \sqrt{R_{\text{hor.}} \cdot R_{\text{vert.}}}$, welke weerstand de specifieke doorlatendheid van de grond vertegenwoordigt.

Het model wordt gelijkvormig aan het dijkprofiel uitgesneden op een gekozen schaal, voor ons geval 1:100. Deze schaal is zo gekozen dat het model niet te groot wordt, maar wel zodanig dat met voldoende nauwkeurigheid de plaats van de elektroden en de meetpunten kan worden bepaald. De onderkant van het model wordt afgesneden op een diepte D, waar de aangenomen ondoorlatende laag zit. Door het afsnijden van het papier ontstaat dan op deze plaats een oneindig grote weerstand. De zijanten worden afgesneden op een afstand van 2D vanuit de binnenteeen respectievelijk buitenteeen van de dijk. De buitenwaterstanden worden gesimuleerd door op het model aangebrachte spanningen. Op de plaatsen waar deze spanningen moeten worden ingevoerd worden elektroden aangebracht. Deze elektroden maakt men door het aanbrengen van een laagje zilveroplossing waarin een dun koperdraadje wordt gelegd. De koperdraadjes zitten na het verharden van de oplossing stevig vast en doen dan dienst als aansluitdraden, welke op de randvoorwaardeapparatuur kunnen worden aangesloten. De potentiaalrandvoorwaarden waar we mee te maken hebben zijn een stormvloedkromme aan de buitenkant van de dijk en een grondwaterstand van N.A.P. aan de binnenkant. De grondwater-

stand aan de achterkant van de dijk wordt gesimuleerd door een spanning van 0 Volt aan te brengen op de desbetreffende electrode. De spanning die op de vooroever in verband met de stormvloed op de electrode wordt aangebracht is variabel en tijdsafhankelijk. De stormvloed kan door middel van allerlei randvoorwaardeapparatuur gesimuleerd worden en worden aangesloten op de electrode aan de voorkant van het model.

De freatische lijn in de dijk kan ten gevolge van de variabele waterstand voor de dijk in hoogteligging variëren. In het model echter kan de freatische lijn maar op één hoogte worden afgesneden, om welke reden er een gemiddelde freatische lijn is bepaald. Op deze gemiddelde freatische lijn worden met behulp van lamellen condensatoren aangesloten die de waterberging in de dijk simuleren. (zie fig.5).

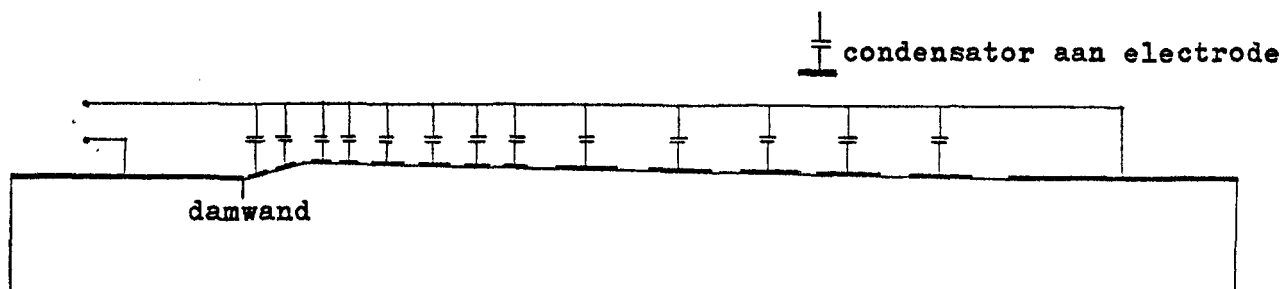


fig.5

Voor de lamelbreedte wordt hierbij de helft van de vervangende breedte aangehouden met een minimumbreedte van 5 mm., in verband met de praktische uitvoering van het model. De capaciteit van de condensatoren wordt bepaald met behulp van formule 12 (zie blz.6). Op plaatsen waar de freatische lijn de onderkant van de bekleding kan bereiken worden de condensatoren afgeschakeld op de desbetreffende plaatshoogte, aangezien er dan geen berging meer kan optreden.

De golfbeweging van het grondwater in het dijklichaam kan, nadat het model gereed gekomen is, zichtbaar worden gemaakt op het scherm van de oscilloscoop en vergeleken worden met de fluctuatie van de buitenwaterstand. Hiervoor is een meetpen verbonden met de oscilloscoop, met welke meetpen de golfbeweging op diverse plaatsen in het model te bepalen is.

6. Uitvoering onderzoek

Voor de uitvoering van het systematisch onderzoek dienen diverse randvoorwaarden en parameters gevarieerd te worden om de invloed van die variatie te kunnen bepalen. Het variëren van deze grootheden is systematisch uitgevoerd om een juiste indruk van de diverse invloeden te krijgen. Voor een goede gang van zaken is een werkprogramma opgesteld. Dit programma moest

aan bepaalde voorwaarden voldoen. Allereerst is het van belang om te weten welke randvoorwaarden en parameters onderzocht dienen te worden. Om dit vast te kunnen stellen is ervaring op het gebied van de grondwaterstroming vrijwel onmisbaar. Op de tweede plaats moeten liefst zoveel mogelijk varianten gemeten worden in een zo kort mogelijk tijdsbestek waarbij de grootte van de variaties niet te groot of te klein genomen mag worden. Bij dit alles moet er nog rekening gehouden worden met het feit dat er goede vergelijkingen mogelijk moeten zijn tussen de verschillende varianten, en dienen de mogelijkheden van het model in het oog gehouden te worden. Om deze redenen zijn er weer besprekingen geweest met de al eerder genoemde mensen van de Deltadienst en het C.O.W. Bij de besprekingen is tevens de opbouw van de stormvloedkromme bepaald. De stormvloed is hierbij samengesteld uit een sinusvormig getij waarop een driehoekige windopzet gesuperponeerd is. (zie fig. 6).

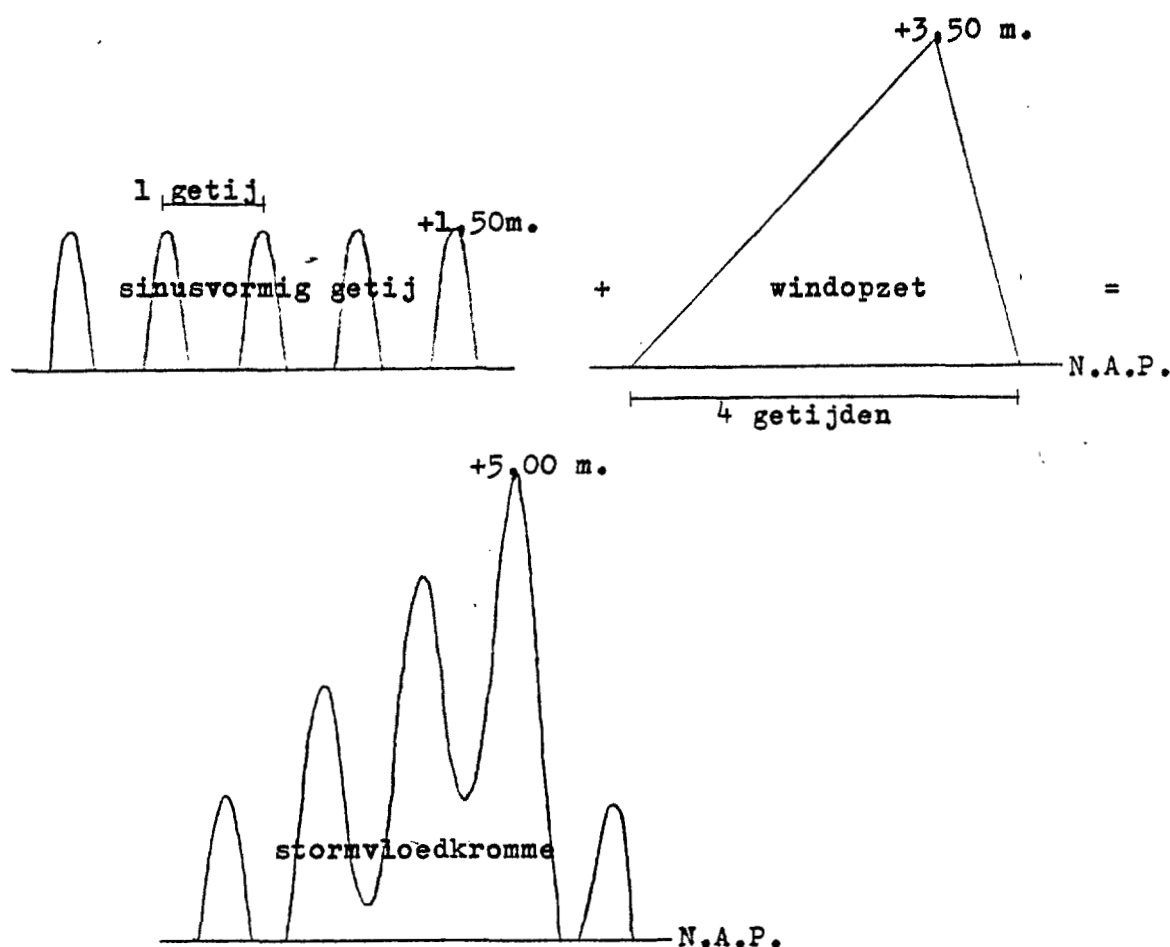


fig. 6

De stormvloedkromme is zo ongunstig mogelijk gekozen met betrekking tot optredende overdrukken. De ongunstige vorm van de kromme wordt hierbij bepaald door de windopzet, welke langzaam stijgt doch echter zeer snel daalt. De bij de besprekingen vastgestelde randvoorwaarden en parameters, die on-

derzocht dienen te worden zijn:

- 1°. Dikte van het watervoerende pakket.
- 2°. De lengte van de damwand aan de teen van de dijk.
- 3°. De doorlatendheidsfactor "k" van het grondpakket.
- 4°. De daalsnelheid van de windopzet.
- 5°. De strandhoogte voor de dijk.
- 6°. Het aanbrengen van een asfaltslab aan de buitenteen.

De meetpunten zijn zodanig gekozen dat ze in de buurt van de damwand dicht bij elkaar liggen dan verderop in de dijk. Die keuze komt voort uit het gegeven dat er vlak achter de damwand het meeste gebeurt met betrekking tot overdrukken, en er hier dus een zo groot mogelijke nauwkeurigheid is gewensd.

De voor de diverse meetpunten gemeten grootheden zijn verzameld in de vorm van tabellen wat betreft de overdrukken, en in grafieken wat betreft de waterstanden in het dijklichaam. De laatstgenoemde grafieken zijn plaatjes waarop de stormvloed en de resulterende waterstand in een bepaald meetpunt voor een bepaalde meting getekend staan. Die grafieken zijn uitgetekend met behulp van een plotter welke op de oscilloscoop is aangesloten. Het beeld dat op de oscilloscoop verschijnt kan namelijk met deze plotter automatisch uitgetekend worden.

De door de metingen verkregen gegevens zijn ook in de vorm van grafieken verwerkt. Die grafieken zijn van belang om het verband tussen de diverse varianten te kunnen achterhalen, terwijl ze tevens een goede controle-mogelijkheid bieden omtrent de juistheid van de metingen. Om de laatste reden worden de grafieken telkens na een bepaalde meting uitgewerkt om te kunnen constateren of er geen grove fouten in de meting voorkomen. In deze grafieken zijn de overdrukken uitgezet tegen de "k"-waarden en tegen de afstand vanuit de teen van de dijk. Ook zijn er grafieken gemaakt waarin de waterstanden in de dijk zijn uitgezet tegen de afstand uit de teen van de dijk bij een vaste waarde van de buitenwaterstand. Met gebruikmaking van al deze grafieken en gegevens dient men nu in de toekomst conclusies te trekken betreffende de onderzochte invloeden. De conclusies zullen echter nog enige tijd op zich laten wachten omdat het onderzoek nog niet volledig is afgerond. Er moeten namelijk nog een redelijk aantal varianten doorgemeten worden, eventueel door een volgende praktikant. Als het systematisch onderzoek volledig is afgerond zal men na vergelijking van de

verkregen resultaten, in staat zijn om de invloeden van de diverse variaties te kunnen vaststellen. Tevens zal men kunnen zeggen welke randvoorwaarden en parameters de grootste invloeden hebben op overdrukken en waterstanden in het dijklichaam. Zodoende zal men kunnen bepalen welke van die randvoorwaarden en parameters nader onderzoek behoeven.

7. Slotwoord

Hoewel het systematisch onderzoek nog niet volledig is afgerond zou het interessant en zeker niet onmogelijk zijn om met de tot nu toe verkregen resultaten al enige conclusies te trekken omtrent de diverse invloeden. Het trekken van deze tussentijdse conclusies zou echter, indien men het goed zou willen doen, zeer tijdrovend zijn. Aangezien ik vrijwel tot het eind van mijn stageperiode aan het meten ben geweest heeft de tijd hiervoor mij ontbroken. Opgemerkt kan echter wel worden, dat, voor zover de resultaten te overzien zijn, de invloeden van de diverse variaties grotendeels beantwoorden aan de verwachtingen. Deze verwachtingen zijn voortgekomen uit de ervaring die men heeft opgedaan met het oplossen van allerlei grondwaterstromingsproblemen. Dit neemt echter niet weg dat het een goede zaak is dat bepaalde verwachtingen nu ook werkelijk geconstateerd en vastgelegd zijn.