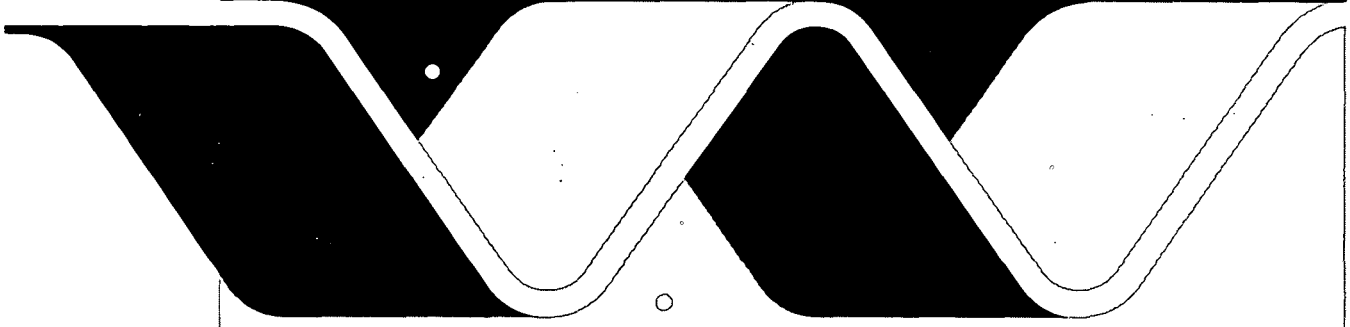


Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



erosie door open taludbekledingen

literatuurstudie en aanbevelingen voor
praktijkgericht onderzoek

H 657 bijlage A
november 1988

verslag bureaustudie



erosie door open taludbekledingen

**literatuurstudie en aanbevelingen voor
praktijkgericht onderzoek**

verslag bureaustudie

J.H. Laboyrie, M. Klein Breteler en H.J. Verhey

INHOUD

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN SYMBOLEN

| | blz. |
|--|------|
| 1. <u>Inleiding</u> | 1 |
| 1.1 Opdracht..... | 1 |
| 1.2 Probleemverkenning..... | 1 |
| 1.3 Opzet van het onderzoek..... | 4 |
| 1.4 Samenvatting en konklusies..... | 5 |
| 2. <u>Open taludbekledingen op oevers</u> | 8 |
| 2.1 Inleiding..... | 8 |
| 2.2 Invloed van blokken met gaten op stroming boven blokken..... | 9 |
| 2.2.1 Literatuurstudie..... | 9 |
| 2.2.2 Conclusies literatuuronderzoek ruwheid..... | 15 |
| 2.3 Stroming en erosie in een gat..... | 16 |
| 2.3.1 Literatuurstudie..... | 16 |
| 2.3.2 Conclusies literatuuronderzoek erosie..... | 22 |
| 2.3.3 Voorspelling van stroming en erosie in gat..... | 24 |
| 2.3.4 Grondwaterstroming..... | 28 |
| 2.4 Konklusies ten aanzien van oevers..... | 32 |
| 3. <u>Open taludbekledingen op dijken</u> | 34 |
| 3.1 Inleiding..... | 34 |
| 3.2 Dijkbekledingen met kleine gaten..... | 34 |
| 3.2.1 Afschatting van optredende belasting..... | 34 |
| 3.2.2 Lokale fluïdisatie..... | 37 |
| 3.2.3 Lanceermechanisme..... | 37 |
| 3.2.4 Uitspoeling van individuele korrel..... | 39 |
| 3.2.5 Erosie-proces van een filter..... | 42 |
| 3.2.6 Vergelijking met metingen..... | 46 |
| 3.2.7 Konklusies ten aanzien van kleine gaten..... | 48 |

INHOUD (vervolg)

| | blz. |
|---|------|
| 3.3 Dijkbekledingen met grote gaten..... | 48 |
| 3.3.1 Inleiding..... | 48 |
| 3.3.2 Waterbeweging op het talud..... | 49 |
| 3.3.3 Snelheid in een gat en erosie..... | 50 |
| 3.3.4 Black-box model op basis van metingen..... | 53 |
| 3.3.5 Konklusies ten aanzien van grote gaten..... | 55 |

LITERATUUR

FIGUREN

APPENDIX I: Doorlatendheid van blokken met grote gaten op zand

APPENDIX II: Aanbevelingen voor verder onderzoek

FIGUREN

1. Enkele bloktypen (A)
2. Enkele bloktypen (B)
3. Cellular revetment block
4. Geoweb
5. Petraflex
6. SVEE-blok
7. Armorflex
8. Terrafix
9. Bloktype W van Ideal B.V.
10. Betomat en Systeem Gobi
11. Basalton en Deltamat
12. Systeem O'Hea
13. Schematisch overzicht van het onderzoek met betrekking tot oevers
14. Onderzoekskader met betrekking tot dijken
15. Stromingsomstandigheden bij kunstmatige ruwheid
16. Definitie van geometrische parameters
17. Relatie tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, Knight/MacDonald en Ryabov
18. Relatie tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, Sayre/Albertson en Adachi
19. Relatie tussen ruwheidsparameters en Nikuradse ruwheid
20. Snelheidsverdeling volgens Knight/MacDonald
21. Snelheidsverdeling volgens Sayre/Albertson
22. Verband tussen k_s/Y en $W + G/Y$ voor kunstmatige ruwheidselementen.
23. Resultaten van Führböter, snelheden in gat
24. Resultaten van Führböter, snelheid boven gat en in gat
25. Gegevens van Parsons en Apmann
26. Resultaten van Rockwell en Knisely
27. Resultaten van Ethembabaoglu
28. Resultaten van Page
29. "Black-box"-model van Brown
30. Resultaten van Rodi
31. Erosie in blokken met gaten
32. $k'_{.1}$ als functie van D_{f15}
33. Lanceermechanisme

FIGUREN (vervolg)

34. Kritieke watersnelheid ten aanzien van uitspoeling
35. Kritieke watersnelheid als functie van korrelgrootte
36. Kans dat alle korrels in de buurt van het gat kleiner dan de gatgrootte zijn

LIJST VAN SYMBOLEN

| | | |
|----------|---|-------------|
| A | aanstroomoppervlak korrel | m^2 |
| A_g | gatoppervlak | m^2 |
| a | halve stripbreedte | m |
| a_b | amplitude van waterbeweging nabij bodem | m |
| a_t | lineaire weerstandscoëfficiënt van filter | s/m |
| a' | lineaire weerstandscoëfficiënt van toplaag | s/m |
| B | breedte van blokelement dwars op stroomrichting | m |
| B' | kort-op-kort gatafstand in breedterichting | m |
| b_f | kwadratische weerstandscoëfficiënt van toplaag | s^2/m^2 |
| b' | kwadratische weerstandscoëfficiënt van filter | s^2/m^2 |
| C | weerstandscoëfficiënt volgens Chezy | $m^{1/2}/s$ |
| C_d | weerstandscoëfficiënt | $m^{1/2}/s$ |
| c_1 | coëfficiënt | - |
| c_f | schuifspanningscoëfficiënt | - |
| D_{50} | karakteristieke steendiameter | m |
| D | dikte toplaag | m |
| D_f | karakteristieke korrelgrootte van filter | m |
| F_g | zwaartekracht | N |
| F_s | stromingskracht | N |
| f_w | coëfficiënt | - |
| G | gatgrootte (zie figuur 16) | m |
| G' | gatgrootte (zie figuur 16) | m |
| g | zwaartekrachtsversnelling | m/s^2 |
| H | golfhoogte, waterspiegeldaling | m |
| H_s | significante golfhoogte | m |
| h | waterdiepte | m |
| h | waterlaagdikte op het talud | m |
| i | verhang | - |
| K | gatgrootte (zie figuur 16) | m |
| k | doorlatendheid ondergrond | (m/s) |
| k' | doorlatendheid van de toplaag | (m/s) |
| k_1 | correctiefactor voor invloed taludhelling | - |
| k_2 | correctiefactor voor verticale stromingscomponent | - |
| k_s | equivalente ruwheid volgens Nikuradse | m |
| L | lengte van blokelement in stromingsrichting (evenwijdig aan dijkas) m | |

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

| | | |
|---------------|---|-------|
| L' | hart-op-hart gatafstand in lengterichting | m |
| L_s | scheepslengte | m |
| L_e | equivalente lengte van een contractie | m |
| L_o | golflengte op diep water = $gT^2/(2\pi)$ | m |
| λ | geometrie-parameter = quotiënt van blokkoppervlak en gatoppervlak | - |
| M_w | korrelgewicht onder water | kg |
| n | porositeit | m |
| O_{90} | karacteristieke openingsgrootte geotextiel | m |
| p | halve breedte van contractie | m |
| Re_* | Reynoldsgetal betrokken op u^*, h en v | - |
| Re | Reynoldsgetal betrokken op u, h en v | - |
| r | bodemruwheid bij golven | m |
| r_{min} | parameter | m |
| T | golfperiode | s |
| u, u_1, u_2 | stroomsnelheid (langs het talud of evenwijdig aan dijkas) | (m/s) |
| u_r | retourstroom | (m/s) |
| u_{z1} | stroomsnelheid op hoogte $z1$ | (m/s) |
| \bar{u} | gemiddelde stroomsnelheid | (m/s) |
| u_w | stroomsnelheid vlak bij bodem in wervel in gat | (m/s) |
| u_* | schuifspanningssnelheid | (m/s) |
| u_g | snelheid in het gat | (m/s) |
| u_{gcr} | kritieke opwaartse snelheid in het gat ten aanzien van uitspoeling van korrels | (m/s) |
| u_k | korrelsnelheid | m/s |
| u_{kmin} | minimaal benodigde korrelsnelheid om gedurende de overbelaste situatie een afstand D af te leggen | (m/s) |
| V | volume van korrel | m^3 |
| V_g | volume van korrels (excl. poriën) die groter zijn dan het gat | m^3 |
| V_k | volume van korrels (incl. poriën) van korrels die kleiner zijn dan het gat | m^3 |
| v_f | filtersnelheid in ondergrond | (m/s) |
| v_g | filtersnelheid in zand direkt onder gat | (m/s) |
| v_s | scheepssnelheid | (m/s) |

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| v_t | filtersnelheid door de toplaag | (m/s) |
| W | blokbreedte (zie figuur 16) | m |
| W' | bloklengte (zie figuur 16) | m |
| w | valsnelheid van een korrel | m/s |
| x | afstand langs het talud omhoog vanaf SWL | m |
| Y | gatdiepte | m |
| Y_e | evenwichtsontgrondingsdiepte | m |
| y, y_1 | horizontale plaatscoördinaat | m |
| z, z_1 | verticale plaatscoördinaat | m |
| ω | hoek van golfival ($90^\circ = 1$) | ° |
| α | coefficient, taludhelling | ° |
| Δ | relatieve dichtheid ($\rho_s/\rho - 1$) van filterkorrel | - |
| Δ_s | relatieve dichtheid van steen in toplaag | - |
| τ | schuifspanning | N/m ² |
| τ_{cr} | kritieke schuifspanning | N/m ² |
| τ_w | schuifspanning onder golven | N/m ² |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ |
| ρ_s | soortelijke massa van blok of korrel | kg/m ³ |
| Φ | transportparameter | - |
| ψ | schuifspanningsparameter | - |
| ν | kinematische viscositeit | - |
| κ | constante van Von Karman (= 0.4) | - |
| θ | hoek inwendige wrijving | ° |
| λ_* | lek lengte | m |
| $\Delta(\phi)$ | verval over toplaag | m |
| δ, δ_* | grenslaagdikte | m |
| ϕ_1, ϕ_2 | drukhoogte | m |
| ϕ_A | verval als gevolg van aanstroomweerstand | m |
| ϕ_t | verval over de toplaag | m |
| ϕ_v | verval over de gatvulling | m |
| Γ_s | invloedsfaktor op de sterkte van de toplaag als gevolg van wrijving en traagheid van de blokken | - |
| x | ruwheidsparameter volgens Knight/MacDonald | - |

1. Inleiding

1.1 Opdracht

In zijn brief van 16 maart 1987, kenmerk WB 570, verleent de hoofdingenieur-direkteur van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde opdracht aan het Waterloopkundig Laboratorium tot het uitvoeren van onderzoek naar de erosie door open taludbekledingen, dat wil zeggen in verband geplaatste elementen met gaten. Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de kritieke waterbeweging bij een oever- of dijkbekleding waarbij nog toelaatbare erosie is te verwachten. De toelaatbare erosie mag daarbij maximaal gelijk zijn aan de hoeveelheid sediment in de gaten. Filter- of basismateriaal gelegen onder de elementen mag dus niet uitspoelen. Bij oeverbekledingen waar vegetatie een rol moet gaan spelen is de toelaatbare erosie kleiner, dat wil zeggen in de gaten dient sediment achter te blijven. De onderhavige bureostudie vormt een inleiding op het onderzoek en is uitgevoerd en gerapporteerd door de irs. J.H. Laboyrie, en M. Klein Breteler en ir. H.J. Verhey.

1.2 Probleemverkenning

Het feit dat onbeschermdde oevers en dijken als gevolg van de waterbeweging kunnen eroderen, kan op diverse manieren voorkomen worden, bijvoorbeeld door toepassing van een harde bekledingskonstruktie. Het probleem wordt daarbij verlegd naar de stabiliteit van de konstruktie. Dichte bekledingskonstrukties (asfalt, dichte zetting van blokken zonder gaten, etc.) worden voornamelijk bedreigd door een opwaarts gerichte verschildruk over de toplaag, terwijl bij een stortsteen talud (of kunstmatige elementen) de afzonderlijke elementen grote krachten als gevolg van oploop en neerloop van de golven te verwerken krijgen, zonder dat ze veel steun aan elkaar hebben. Een tussenvorm tussen een dichte bekleding en een stortsteen bekleding is de open konstruktie, bestaande uit in verband geplaatste elementen met grote gaten. De elementen zijn doorlatend genoeg om te voorkomen dat er grote verschildrukken ontstaan, geven elkaar steun vanwege het verband en zorgen voor een zodanige reductie van de waterbeweging in de gaten dat het relatief lichte filter- of basismateriaal niet kan eroderen.

Voorbeelden van dergelijke open konstrukties zijn gegeven in figuur 1 tot en met 12. De in figuur 1 gegeven elementen zijn ook geschikt voor toepassing bij

golfbrekers die zwaar door golven worden belast. De konstruktie uit figuur 4 is een extreem voorbeeld van een konstruktie waarbij geen verschildrukken kunnen ontstaan. Het bestaat uit platte (plastic) strips die om de 40 cm vastzitten aan de naburige strips, zodat het geheel als een harmonica uittrekbaar is en er vakken ontstaan. Deze vakken worden gevuld met zand, teelaarde of een ander granulair materiaal.

Soms wordt onder de elementen een geotextiel toegepast om erosie van het basismateriaal te voorkomen (figuur 8, 10 en 11).

Een zeer belangrijk aspect van een open taludbekleding is de mogelijkheid voor planten om door de bekleding heen te groeien. Dit maakt de konstruktie niet alleen milieuvriendelijker, maar verhoogt tevens de stabiliteit van de elementen en de erosiebestendigheid van de gatvulling.

Onderwerp van deze burostudie is de toelaatbare waterbeweging op de konstruktie, waarbij de aandacht is gericht op eventuele erosie door de top laag. Voor konstrukties die kunnen doorgroeien met vegetatie geldt dat de erosie niet zodanige vormen mag aannemen dat voor de stabiliteit van de top laag of de kwaliteit van de vegetatie gevreesd hoeft te worden. Vooral het pioniersstadium is bij dit laatste van belang.

Ten aanzien van de belasting op de open bekleding moet er onderscheid worden gemaakt in oeverbekledingen en dijkbekledingen (of golfbrekers). Bij de eerste is er sprake van een waterbeweging bij de konstruktie als gevolg van scheepspassages, onder te verdelen in [29]:

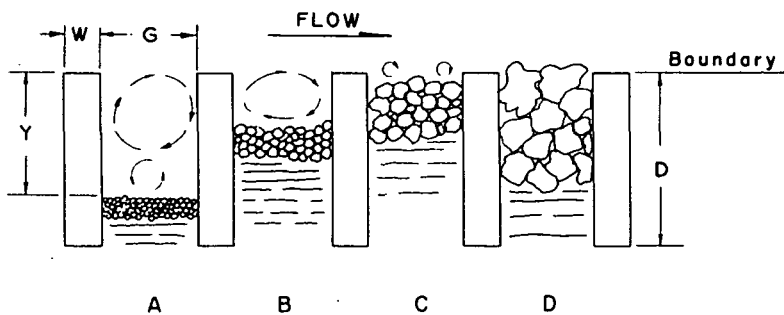
1. retourstroom.
2. secundaire golven van boeg en hek.
3. waterspiegeldaling.
4. haalgolf.
5. schroefstraal.
6. volgstroom.

Maatgevend voor het bovenste deel van een oeverbekleding (deel gelegen tussen de ongestoorde waterspiegel en een waterdiepte van circa 1,0 m) zijn de haalgolf en de secundaire golven. De laatste vertonen een analoog gedrag als windgolven, maar vallen schuin in. Voor lager gelegen delen van het talud is de retourstroom met de waterspiegeldaling maatgevend.

Bij dijken bestaat de belasting uit windgolven, waarbij gedacht moet worden aan:

1. uittredend debiet (verhang) tijdens maximale golfsterugloop.
2. stroming over het talud tijdens golfoploop en -terugloop.
3. golfklap.

Aan de hand van de onderstaande figuur kan de werking van de open bekleding worden verklaard [2]:



ACTION OF CELL IN BANK STABILIZATION [2]

De volgende twee invloeden zijn te onderscheiden:

1. De stenen worden op hun plaats gehouden door de wanden van de gaten. De sterkte is dus vergroot ten opzichte van een onverdedigd talud.
2. De schuifspanning op het erodeerbare oppervlak wordt door de gaten gereduceerd. De belasting is dus kleiner.

Voor situatie A is de tweede invloed dominant, terwijl voor D de eerste het belangrijkste is. Situatie D zal in dit onderzoek niet worden onderzocht. Hierbij is sprake van een overgang naar een steenzetting. Onderwerp van studie vormen de situaties A t/m C.

Het erosie-mechanisme als gevolg van de stroming over het talud komt bij oevers en dijken in principe overeen. In beide gevallen is er een stroming over het talud die de gatvulling wegspoelt, totdat er een gat ontstaat met een neer met voldoende lage snelheid. Het is hierbij denkbaar dat er zelfs twee neren boven elkaar nodig zijn voordat een evenwicht is bereikt (situatie A in bovenstaande figuur). Wat 'voldoende laag' is voor de snelheid in de neer wordt bepaald door de gatvulling en het uittredende debiet door de toplaag. Voor kleine diepe gaten (gatdiepte veel groter dan de gatbreedte), die niet met granulair materiaal zijn gevuld, is het uittredende debiet maatgevend voor eventuele erosie. De overtrekkende waterstroom is dan niet in staat om onder in het gat enige waterbeweging van betekenis te veroorzaken.

1.3 Opzet van het onderzoek

Voor het op oevers gerichte onderzoek wordt als uitgangspunt de waterbeweging op enige afstand van de oever gekozen. Deze afstand is zodanig dat de ruwheid van het talud de waterbeweging nog niet beïnvloedt, maar de daar optredende watersnelheid en golfhoogte bepalend is voor de snelheid op zeer kleine afstand van de toplaag en de snelheid in de gaten.

De grootte van de waterbeweging op enige afstand valt buiten het kader van deze studie. Hiervoor wordt verwezen naar het onderzoek "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen" [29].

In figuur 13 is een overzicht van het onderzoek in de vorm van een schema gegeven. Het vangt aan met de waterbeweging op enige afstand van het talud. Samen met informatie over de geometrie moet vervolgens de snelheid vlak boven de blokken berekend kunnen worden. De volgende stap in het schema leidt tot de snelheid in het gat, waarmee vastgesteld moet kunnen worden of er erosie optreedt.

Als alternatief voor de hiervoor geschetste lijn, welke een meer fundamenteel karakter heeft, is een "black-box" benadering in het schema opgenomen. De invoer hiervoor is de snelheid op enige afstand, waarna de vraag of er erosie optreedt op basis van resultaten van (fysisch model) onderzoek direct wordt beantwoord.

Voor dijken geldt een soortgelijke opzet (zie figuur 14). De overdrachtsfunctie van de golfrandvoorwaarde naar de snelheid op het talud valt hier wel binnen het kader van het onderzoek. Met de snelheid op het talud en het eventuele verhang over de toplaag moet vervolgens de snelheid in het gat bepaald kunnen worden, zodat beoordeeld kan worden of er erosie is te verwachten. Ook bij dijken is er een "black-box"-lijn mogelijk.

Hoewel in deze studie de oevers en dijken gescheiden behandeld zijn, is er duidelijk sprake van een overlap. De stappen in de fundamentele lijn in het onderzoek tussen "de snelheid op enige afstand van de taludbekleding" en "de mate van erosie" zijn in beide gevallen identiek. Dit onderwerp wordt in detail behandeld bij oevers en slechts kort bij dijken bekeken.

Deze burostudie omvat een inventarisatie van de huidige kennis en geeft mogelijkheden om door middel van onderzoek de kennis uit te breiden, gericht op de wens om open bekledingen verantwoord te kunnen ontwerpen.

1.4 Samenvatting en konklusies

Bij de probleemverkenning is vastgesteld dat het type taludverdediging, dat in deze buro-studie onderzocht is, een tussenvorm is tussen een dichte bekleding (zoals dichte steenzetting of asfalt) en een bekleding van stortsteen (of willekeurig geplaatste golfbrekerelementen). Een zeer belangrijk aspect van een open oeverbekleding is de mogelijkheid voor planten om door de bekleding te groeien. Dit verhoogt de stabiliteit van de elementen en de erosiebestendigheid van de gatvulling en leidt tevens tot een hogere milieukundige waardering dan een verdediging zonder vegetatie.

In deze buro-studie is de kennis geïnventariseerd op het gebied van de toelaatbare waterbeweging op de konstruktie, waarbij de aandacht is gericht op eventuele erosie door de toplaag. Het mondt uit in een aanbeveling voor verder onderzoek.

Vanwege het verschil in hydraulische belasting is er onderscheid gemaakt tussen oevers (scheepsgeïnduceerde belasting) en dijken (windgolven). Bij de eerste wordt uitsluitend gekeken naar konstrukties op zand of teelaarde, terwijl bij de laatste alleen konstrukties op een granulaair filter zijn beschouwd. De opzet van de studie is schematisch weergegeven in figuur 13 en 14.

De waterbeweging op enige afstand van een oever is alleen afhankelijk van de kanaalgeometrie en het passerende schip [29]. Dit is als randvoorwaarde genomen. De retourstroom en de haalgolf zijn maatgevend (secundaire scheepsgolven zijn identiek aan windgolven en worden impliciet meegenomen bij de dijken). Beide zijn op te vatten als een stroming langs het talud. Vlak bij de oever is er een invloedsgebied van de oever (met bekende grootte [18]), waar de ruwheid van het talud van invloed is op het snelheids-profiel. Ondanks dat het snelheidsprofiel als geheel niet is ontwikkeld, is er in het invloedsgebied een logaritmisch snelheidsprofiel aanwezig. De belangrijkste onbekende in de formule van het snelheidsprofiel is de ruwheid k_s .

De grootte van k_s van een open taludbekleding is slechts bij benadering bekend. Wel is veel literatuur beschikbaar met betrekking tot kunstmatige ruwheidselementen. Dit zijn bijvoorbeeld blokjes op een vlakke bodem, in plaats van gaten in een bodem of talud, zoals bij open taludbekledingen. De resultaten uit de literatuur moeten daarom worden geëxtrapoleerd naar een geometrie die hier aan de orde is.

Uit de literatuur blijkt dat de snelheid in een gat afhankelijk is van de snelheid er vlak boven en de verhouding G/Y (G =gatbreedte; Y =gatdiepte). Als G/Y ongeveer gelijk is aan 1, dan ontstaat er een neer in het gat, die ronddraait met orde 25% van de snelheid boven het gat. Als G/Y ongeveer gelijk is aan 0,5, dan ontstaan er twee neren boven elkaar, waarbij de onderste neer nog slechts weinig in beweging is.

In paragraaf 2.3.2 is een rekenmethode gegeven waarmee de schuifspanning op de bodem van een gat kan worden bepaald. Wordt dit vergeleken met de kritieke schuifspanning volgens Shields, gekorrigeerd voor de taludhelling en het verhang loodrecht op de gatbodem, dan kan een voorspelling van de erosie gegeven worden. De resultaten van zo'n berekening blijken redelijk overeen te stemmen met de metingen uit de literatuur.

Met de resultaten uit [19] is het mogelijk gebleken een black-box model op te zetten (zie figuur 36). Alleen de invloed van de taludruwheid is er niet in opgenomen. Dit laatste is essentieel om het black-box model te kunnen gebruiken.

Voor een open dijkbekleding met relatief kleine gaten ($G/Y < 3$), belast door windgolven, is gekonkludeerd dat uitspoeling zal optreden als het door de toplaag naar buiten stromende water de korrels kan meevoeren. De stroomsnelheid op het talud is hier niet van belang. Het lijkt ook niet aannemelijk te zijn dat een golfklap bijdraagt aan de uitspoeling.

Op basis van een empirische formule voor de kracht op een bol in een buis met cirkelvormige doorsnede is een formule afgeleid waarmee de kritieke snelheid in het gat berekend kan worden voor het geval dat uitspoeling door een uittredend debiet maatgevend is. Getracht is deze formule te toetsen met het onderzoek dat in de literatuur is te vinden. Helaas was hiervoor geen geschikt materiaal aanwezig.

Uit het Oesterdamonderzoek [34] is gekonkludeerd dat bij een gat, dat orde twee maal dieper is dan breed, niet uitsluitend het uittredende debiet van belang is, maar ook de waterbeweging als gevolg van het over het talud stromende water. Op basis van [24] is een betrouwbare afschatting van de maximale snelheid op het talud mogelijk. Als er ook een uittredend debiet is te verwachten, is er echter onvoldoende kennis beschikbaar om hiermee de waterbeweging in het gat te bepalen, zoals in het geval van de Oesterdam. Ook de erosie is dan niet te berekenen.

Bij een toplaag met grote gaten en een relatief fijne gatvulling is uitstromende water te verwaarlozen en kan met de kennis uit hoofdstuk 2 de

snelheid in het gat en de erosie voorspeld worden. Bij een vergelijking van de berekende erosie met de metingen [31] blijkt dat de gemeten erosie groter is. Wellicht is dit het gevolg van de grote snelheid op het talud. De gatdiepte blijkt 1,5 maal de gatbreedte te worden, in plaats van 1 maal.

Voor dijken geldt dat er onvoldoende meetresultaten beschikbaar zijn om een black-box model op te zetten.

Voor het aanbevolen vervolgonderzoek wordt verwezen naar Appendix II. Een deel van het aldaar aanbevolen onderzoek is uitgevoerd (zie de bijlagen B, C en E van het onderzoek H657 "Erosie door open taludbekledingen").

2. Open taludbekledingen op oevers

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op erosie van materiaal uit een wat betreft in potentie aanwezige mogelijkheden, milieuvriendelijke oeververdediging, die bestaat uit een doorgroeiconstructie met relatief grote gaten (blokdikte D en gatgrootte G, $0,2 < D/G < 1,0$, zie figuur 16b). De oeververdediging wordt belast door stroming en golven waarbij met name genoemd kunnen worden de retourstroom, haalgolf en secundaire scheepsgolven, alle opgewekt door de scheepvaart. Uit het langjarig onderzoek "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen" zijn deze belastingen als maatgevend naar voren gekomen [29]. Haalgolf en secundaire scheepsgolven belasten daarbij het talud rondom de waterlijn, en de retourstroom de lager gesitueerde taludgedeelten. Vanwege de analogie met windgolven worden secundaire scheepsgolven behandeld bij dijken (hoofdstuk 3). Beide andere verschijnselen, haalgolf en retourstroom, zijn te beschouwen als stroombelastingen. Wel kunnen juist voor de passage van de haalgolf overdrukken ontstaan, waarvoor eveneens wordt verwezen naar het hoofdstuk over dijken. De verschillende stappen van uitwendige randvoorwaarden naar eventuele erosie zijn in figuur 13 schematisch aangegeven.

Met behulp van de resultaten van het onderzoeksprogramma M1115 'Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen' [29] is de scheepsgeïnduceerde waterbeweging (onder andere retourstroom en haalgolf) op enige afstand van het talud (orde 1 m) te bepalen. Deze waterbeweging wordt als randvoorwaarde gezien, die niet in de studie wordt onderzocht. Centraal in deze studie zal staan de waterbeweging in een strook van circa 1 m gerekend vanaf het talud, die zich uitstrekt vanaf de waterlijn tot aan teen talud. Dicht bij de oeverbekleding (orde 10 cm) is de invloed van de ruwheid van de bekleding van betekenis. Indien deze invloed op het snelheidsprofiel bekend is kan een relatie worden gelegd tussen genoemde scheepsgeïnduceerde waterbeweging en locale stroming boven de top laag. Deze locale stroming boven de top laag bepaalt de waterbeweging in het gat en de eventueel daardoor optredende erosie van materiaal uit dat gat (zie figuur 13). Dit laatste zou nog beïnvloed kunnen worden door een uittrekkend debiet dat een gevolg is van de waterspiegeldaling.

Nagegaan is of er in de literatuur informatie voorhanden is om iets te kunnen zeggen over de relaties gepresenteerd in figuur 13. In paragraaf 2.2 is beschouwd de relatie tussen de geometrie van de blokken en de stroming boven de blokken, waarbij twee sporen zijn te onderscheiden. Het ene spoor heeft betrekking op snelheidsprofielen boven doorgroeiconstructies en het andere spoor betreft snelheidsprofielen boven bodems met kunstmatige ruwheid. In paragraaf 2.3 is vervolgens de literatuurstudie gericht op de stroming in het gat en de eventueel optredende erosie.

2.2 Invloed van blokken met gaten op stroming boven blokken

2.2.1 Literatuurstudie

De aanwezigheid van een oeververdediging bestaande uit blokken met relatief grote gaten heeft invloed op het lokale snelheidsprofiel bij de bekleding. In vergelijking tot een gesloten constructie met karakteristieke ruwheid is in het onderhavige geval de invloed van de blokken met gaten op het snelheidsprofiel wellicht anders.

Als uitgangspunt voor de bestudering van blokken met gaten worden eerst voor een vlakke bodem een aantal formules gegeven, waarmee de relatie tussen de snelheid op een bepaalde hoogte boven de bodem en de ruwheid van de bodem kan worden beschreven. Tevens zal daarbij worden ingegaan op de verschillen tussen uniforme stroming met een volledig ontwikkelde grenslaag en retourstroom en haalgolfstroom waarbij de grenslaag niet volledig is ontwikkeld. Daarna zal ingegaan worden op de situatie dat de bodem bestaat uit een constructie met gaten. De bovenzijde van de bekledingselementen wordt daarbij aangehouden als de bodem.

Vlakke bodem

Voor een uniforme stroming, waar de snelheidsverticaal zich heeft aangepast aan de bodemruwheid, kan de schuifspanningssnelheid u_* worden gerelateerd aan de stroomsnelheid u op een bepaalde hoogte z in de verticaal volgens [36] (met $\kappa = 0,4$ en hydraulisch ruw):

$$\frac{u}{u_*} = 5,75 \log \left(\frac{30 z}{k_s} \right) \quad (2.1)$$

waarin:

- u = stroomsnelheid op afstand z (m/s)
- z = afstand tot bodem (m)
- u_* = schuifspanningssnelheid = $\sqrt{(\tau/\rho)}$ (m/s)
- τ = schuifspanning (N/m²)
- ρ = dichtheid water (kg/m³)
- k_s = equivalente zandruwheid, voor granulair materiaal
geldt $k_s = 2 D_{50}$ (m)

Na integratie over de hoogte h en onder voorwaarde dat $k_s \ll h$ is af te leiden:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5,75 \log \frac{12 h}{k_s} \quad (2.2)$$

waarin:

- h = waterdiepte (m)
- \bar{u} = gemiddelde snelheid in doorstroomprofiel (m/s)

Met behulp van de formule van Chezy [36] voor een brede waterloop:

$$\bar{u} = C \sqrt{hi} \quad (2.3a)$$

$$u_* = \sqrt{(\tau/\rho)} = \sqrt{g h i} \quad (2.3b)$$

waarin:

- C = weerstandscoefficient volgens Chezy (m^{1/2}/s)
- i = verhang in waterloop (-)

en vgl. (2.2) kan voor een hydraulisch ruwe wand worden afgeleid:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,75 \log (12 h/k_s) \quad (2.4)$$

Na combinatie van vgl. (2.2) en (2.4) volgt

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (2.5)$$

Opgemerkt wordt dat de ruweidcoëfficiënt C beïnvloed wordt door de waterdiepte, terwijl dit minder het geval is voor de equivalente ruweid k_s . Door de invloed van de logaritmische bewerking is de invloed van h op C echter evenzeer beperkt.

In het bovenstaande is steeds sprake van een logaritmisch snelheidsprofiel in de vertikaal met daarbij behorend een volledig ontwikkelde turbulente grenslaag nabij de bodem. Het snelheidsprofiel behorend bij retourstroom en haalgolf/volgstroom is daarentegen ongeveer blokvormig, dat wil zeggen een constante snelheid over de vertikaal met uitzondering van een grenslaag nabij de bodem waar de snelheid voldoet aan een logaritmisch profiel [18]. De grenslaag als gevolg van de retourstroom is bovendien niet volledig ontwikkeld, maar neemt toe in dikte bij toenemende afstand tot de boeg. Bij het hek van het schip is echter de volledige grenslaagdikte nog niet bereikt, behorend bij de optredende stroomsnelheid.

Wat betreft de grenslaagontwikkeling en de gevolgen daarvan voor de relatie tussen ruweid en snelheid boven de bodem kan voor de retourstroom een analogie worden getrokken met uniforme stroming langs een vlakke plaat. Schlichting heeft hiervoor afgeleid de schuifspanningscoëfficiënt c_f :

$$c_f = \left\{ 2,87 + 1,58 \log \frac{l}{k_s} \right\}^{-2,5} \quad (2.6)$$

waarbij c_f is gedefinieerd volgens

$$c_f = \tau / \left(\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \right) \quad (2.7)$$

met \bar{u} = gemiddelde snelheid (m/s)

De parameter l is een functie van stroomsnelheid (u_r), vaarsnelheid (v_s) en afstand tot de boeg (x) in geval van retourstroom, volgens

$$l = \frac{u_r}{v_s + u_r} \cdot x \quad (2.8)$$

met $x = 0,1$ à $0,2 L_s$ (x = afstand achter de boeg, L_s = scheeps lengte).

Voor de haalgolf kan een analoge formule als vgl. (2.6) worden bepaald.

Het verband tussen c_f en C bij een volledig ontwikkelde grenslaag bij uniforme stroming is af te leiden door combineren van vgl. (2.3) en de relatie

$$\tau = \rho g h i \quad (2.9)$$

wat resulteert in:

$$\tau = \frac{g}{C^2} \cdot \rho \bar{u}^{-2} \quad (2.10)$$

Vergelijken van vgl. (2.7) met (2.10) geeft het verband:

$$c_f = \frac{2g}{C^2} \quad (2.11)$$

Het niet ontwikkeld zijn van de grenslaag betekent dat de waarde van c_f in dat geval veel groter is (en dus de waarde van C kleiner), dan de waarde bij een ontwikkelde grenslaag bij gelijke gemiddelde stroomsnelheid. Een grotere eroderende werking is het gevolg.

Konkluderend kan worden gesteld dat bij gegeven gemiddelde snelheid van retourstroom of haalgolf/volgstroom, het snelheidsprofiel nabij de bodem bekend is als functie van de afstand tot de boeg van het schip. In [18] zijn daartoe formules gegeven, waarmee grenslaagdikte en stroomsnelheden kunnen worden berekend.

Bodem met ruwheidselementen

In paragraaf 2.1 is reeds aangegeven dat twee sporen zullen worden gevolgd. Wat betreft het ene spoor, snelheidsprofielen boven doorgroeiconstructies, heeft literatuuronderzoek geen informatie opgeleverd.

De nadruk bij dit aspect van de literatuurstudie ligt dus op het tweede spoor: snelheidsprofielen boven bodems met kunstmatige ruwheid. Twee uitersten zijn hierbij relevant. Een bodem zonder ruwheidselementen (figuur 15a), en een bodem met dicht op elkaar geplaatste ruwheidselementen (figuur 15f). In beide gevallen is er sprake van een lage stromingsweerstand (dus lage k_s -waarde en bij gevolg een hoge C -waarde). Bij een toenemende dichtheid van ruwheidselementen zal de stromingsweerstand tengevolge van toenemende energieverliezen toenemen tot een maximum, om vervolgens bij nog verder toenemende dichtheid weer af te nemen, omdat de openingen tussen de elementen niet meer deelnemen aan de stroming [36]. De geometrische parameters (zie figuur 16) bepalen de zes te onderscheiden stromingsomstandigheden gepresenteerd in figuur 15.

Open taludbekledingen kunnen worden beschouwd als een constructie met ruwheidselementen op zeer kleine onderlinge afstand. De parameter die de ruwheid typeert, k_s (zie vgl. (2.4)) is echter moeilijk rechtstreeks te bepalen voor een oeververdediging bestaande uit een doorgroeiconstructie. In het kader van WL-speurwerk zijn recent metingen uitgevoerd naar de ruwheid van Armorflex-blokkenmatten [20]. Deze proeven zijn in het kader van het onderhavige onderzoek gerapporteerd (bijlage D van verslag H 657). In het navolgende zullen de resultaten worden behandeld.

Uitgangspunt is de relatie:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,75 \log \frac{12 h}{k_s} \quad (2.4)$$

Uiteindelijk doel van deze bureaustudie is na te gaan wat de snelheid vlak boven de blokken (orde 10 cm) is als functie van de snelheid op enige afstand van de blokken (orde 1 m). Als een logaritmisch snelheidsprofiel zich voordoet, dan betekent dit het volgende:

$$u = \frac{u_{z1}}{\log(30 z_1/k_s)} \log \left(\frac{30 z}{k_s} \right) \quad (2.12)$$

waarin:

u_{z1} = stroomsnelheid op hoogte z_1 (orde 1 m) (m/s)

u = stroomsnelheid op hoogte z (m/s)

Van belang is nog op te merken dat er steeds sprake is van turbulente stroming met als ondergrens een hydraulisch gladde wand, waarvoor geldt:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,75 \log \frac{12 h}{\delta/3,5} \quad (2.13)$$

Kombinatie van (2.4) en (2.13) resulteert in de bekende White-Colebrook formule voor het overgangsgebied tussen een hydraulisch gladde en een hydraulisch ruwe wand.

Onderzoek in zake kunstmatige ruwheid is onder andere verricht door Knight/MacDonald [12], Sayre/Albertson [14], Ryabov [15] en Adachi [13]. Hun resultaten zijn bevestigd door anderen [16], [17]. De genoemde onderzoeken hebben geresulteerd in relaties voor het snelheidsprofiel en in relaties

aangevend het verband tussen geometrische parameters en de hydraulische ruwheid. De karakteristieke vorm van die relatie is:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = C_1 \log \frac{h}{\chi} \quad (2.14)$$

waarin:

χ = ruwheidsmaat, $\chi = f$ (geometrie parameters) [m].

Uit de onderzoeksresultaten (zie figuren 17, 18 en 19) blijkt dat de ruwheidsmaat k_s op logaritmisch papier een parabolisch karakter heeft. De resultaten zijn geheel conform de eerder genoemde theorie van Morris welke in figuur 15 aanschouwelijk is gemaakt.

Daarnaast blijkt uit de resultaten dat de snelheidsverdeling over de vertikaal een logaritmisch karakter heeft (zie de figuren 20 en 21). Wel komen de verschillende onderzoekers tot verschillende waarden voor de coëfficiënt C_1 . Dit hangt echter samen met verschillen in de gebruikte definitie van $z = 0$.

Ook zijn er verschillen tussen het aantal bij het onderzoek betrokken geometrie-parameters en daarmee dus tussen het verband tussen χ en die geometrie-parameters. Niettemin zijn alle resultaten te herleiden tot het volgende verband:

$$\frac{k_s}{Y} = f \left(\frac{W + G}{Y} \right) \quad (2.15)$$

In [20] is aangetoond dat voor de situatie $Y = W$ de diverse resultaten met elkaar in overeenstemming zijn (figuur 22) met uitzondering van Adachi's resultaten. Dit hangt echter samen met de door hem gebruikte (afwijkend van de anderen) definiering van het niveau van de bodem. Vanwege het grote aantal experimenten dat Knight/MacDonald bij hun analyse hebben gebruikt (in totaal 433 proeven met strips en kubussen, zowel van eigen experimenten als van anderen), worden hun resultaten aanbevolen bij de voorspelling van de ruwheid van open taludbekledingen. Deze luiden (zie ook figuur 22):

$$a) \quad k_s/Y = 0,08 \left(\frac{W + G}{Y} \right)^{2,685} \quad \text{voor} \quad \frac{W + G}{Y} < 5 \quad (2.16)$$

$$b) \quad k_s/Y = 400 \left(\frac{W + G}{Y} \right)^{-1,295} \quad \text{voor} \quad \frac{W + G}{Y} > 15 \quad (2.17)$$

$$c) \quad \text{overgangskromme volgens figuur 22 voor} \quad 5 < \frac{W + G}{Y} < 15 \quad (2.18)$$

Zoals uit de figuur blijkt treedt een maximale ruwheid op voor $W + G/Y = 8$.

Met een voorbeeld zal het gebruik van bovenstaande formules worden toegelicht. Stel, er geldt (zie ook figuur 16A):

$$W = W' = K = G' = 0,25 \text{ m}$$

$$G = 0$$

$$Y = 0,25 \text{ m}$$

Er is af te leiden:

$$\frac{W + K}{Y} = 2$$

De bodem met ruwheidselementen is nu ontaard in een bodem met gaten. Aangezien voor een bekleding met gaten de gatgrootte is gedefinieerd als G (en niet als K, zie figuur 16B), gaat deze vergelijking over in:

$$\frac{W + G}{Y} = 2$$

Door substitutie in vgl. (2.16) volgt:

$$k_s/Y = 0,514$$

Dit levert een equivalente ruwheid op van $k_s = 0,13 \text{ m}$. Een zelfde resultaat kan worden verkregen door uit te gaan van de oorspronkelijke resultaten en formules van de diverse onderzoekers. Dit is verder achterwege gelaten.

In [20] is voor Armorflex-blokkenmatten een waarde van $k_s = 0,02 \text{ m}$ bepaald met proeven. Deze waarde bleek eveneens voorspelbaar te zijn met vgl. (2.16).

2.2.2 Conclusies literatuuronderzoek ruwheid

Op basis van dit gedeelte van het literatuuronderzoek kunnen de volgende conclusies met betrekking tot een oeververdediging bestaande uit een doorgroeiconstructie worden getrokken:

- De stroomsnelheid vlak boven de toplaag bestaande uit blokken met gaten kan globaal worden afgeschat met behulp van relaties ontleend aan de literatuur in zake de equivalente ruwheid van kunstmatige ruwheidselementen. (formule 2.16 t/m 2.18)

- De hierbij benodigde snelheidsverdeling in de vertikaal blijkt een logaritmisch karakter te bezitten.
- Voor Armorflex-blokkenmat is een waarde van $k_s = 0,02$ m berekend, wat goed overeenkomt met proeven [20].

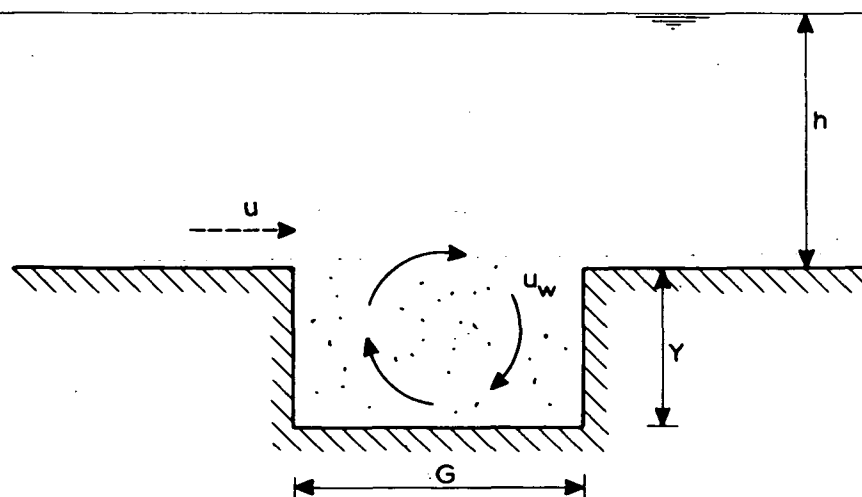
2.3 Stroming en erosie in een gat

2.3.1 Literatuurstudie

In deze paragraaf zal literatuur in relatie met erosie door stroming in gaten worden behandeld. Aan het einde van de paragraaf zal op basis van de gegevens uit de literatuur een conclusie ten aanzien van de beoogde gatconfiguratie in het huidige onderzoek gegeven worden.

Gezocht is naar literatuur met betrekking tot relaties tussen de snelheid boven de toplaag (u) en de snelheid in het gat (u_w). Hierbij spelen factoren als geometrie van de blokken en het aantal wervels in het gat een rol. Daarnaast zal de erosie van het opvulmateriaal de nodige aandacht krijgen (mate van erosie en toelaatbare erosie).

De volgende karakteristieke parameters voor een gat worden hier gehanteerd:



Führböter [1]

Führböter beschrijft in [1] een onderzoek uitgevoerd naar de kantelstabiliteit van blokken onder belasting door stroming. Voor de onderhavige bureaustudie is echter alleen het gedeelte van belang waarin de stroming in gaten en de daarmee samenhangende erosie uit die gaten behandeld worden.

In figuur 23 is een dwarsdoorsnede gegeven van het gat ($Y = 0,30$ m, $G = 0,60$ m en $Y/G = 0,5$ m). Het betreft slechts 1 gat waarover met verschillende stroomsnelheden is gestroomd. In het gat zijn granulaire materialen neergelegd met verschillende afmetingen. Boven het gat en in het gat zijn de stroomsnelheden gemeten. De hier vermelde waarden zijn modelmaten.

Opgemerkt wordt dat aan de benedenstroomse kant van het gat een klein opzetje is gemonteerd om de ongelijke ligging van blokken en de invloed daarvan op de stroomsnelheden, na te bootsen.

Tijdens de proeven bleek dat er in het gat 1 wervel optrad. In figuur 24 is het verloop van de snelheden in de wervel op $0,015$ m en $0,075$ m boven de bodem als functie van de snelheid u boven het gat gegeven.

Uit de figuur volgt dat de verhouding u_w/u in het meetbereik ligt tussen $0,30$ en $0,60$. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat mondelinge informatie verkregen van Führböter, heeft geleerd dat u betrekking heeft op gemiddelde snelheden en u_w op de maximale snelheden (dat wil zeggen gemiddelde verhoogd met turbulentieïntensiteit). Als hiervoor wordt gecorrigeerd, daarbij veronderstellend dat $u_{w,max} \approx u_w \cdot 1,4$, dan volgt voor de verhouding u_w/u een meetbereik van $0,20$ - $0,40$.

De resultaten van de erosie proeven zijn in onderstaande tabel bijeengezet met daarbij voor u_w de waarden zoals oorspronkelijk door Führböter gepresenteerd.

| steendiameter (mm) | u_w (m/s) | mate van erosie |
|-----------------------|----------------|----------------------------------|
| 3 | 0,4 - 0,7 | stenen worden uit gat geslingerd |
| 9 | 0,4 - 0,6 | stenen bewegen |
| | 1,2 - 1,8 | stenen worden uit gat geslingerd |
| 10 | 0,5 - 0,8 | stenen bewegen |
| 20 | 1,5 - 2,1 | stenen worden uit gat geslingerd |
| | 1,0 - 1,4 | stenen bewegen |
| 45 | 1,8 - 2,5 | stenen worden uit gat geslingerd |

Parsons en Apmann [2]

In dit onderzoek zijn betonnen blokken ($D \times L \times B$, 0,102 x 0,610 x 0,406 m³, zie figuur 25), doorboord met vierkante gaten (0,051 x 0,051 m²), langs een sterk eroderende oever in een buitenbocht (talud 1:2) in West New York neergelegd en gedurende een periode van 8 jaar bestudeerd. Naast deze blokken waarvan de gaten gevuld waren met granulair materiaal, was een stortstenen oeververdediging met mediane diameter van 0,432 m neergelegd. Zodoende lagen er een meetsectie en een referentiesectie achter elkaar.

Gedurende de in-situ proeven zijn een aantal parameters verzameld die betrekking hebben op twee hoogwaters:

| periode hoogwaters | gemiddelde snelheid (m/s) | schuifspanning (N/m ²) | Froude getal (-) |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| juni 1958 | 2,225 | 32,56 | 0,67 |
| maart 1960 | 2,560 | 35,91 | 0,66 |

Bij deze waarden was hevige erosie tijdens enkele hoogwaters waar te nemen van de stortsteen met $D_{50} = 0,432$ m. Vermeld wordt dat eigenlijk een diameter van 0,660 m benodigd is voor een stabiele situatie. Voor wat betreft de celblokken

trad er nauwelijks schade op, slechts enkele blokken verdwenen. Ook het granulaire materiaal in de cellen waarvan de diameter veel kleiner was dan 0,432 m bleek veel stabiel. Helaas wordt niet vermeld welke D_{50} hiervoor gebruikt is.

Volgens [2] treedt onder stroombelasting een evenwichtsdiepte op indien het materiaal tot een diepte van $Y = Y_e$ is geerodeerd (zie figuur 25). Het blok zal stabiel zijn indien D voldoende groter is dan Y_e . In [2] wordt de verwachting uitgesproken dat de evenwichtsdiepte afhankelijk zal zijn van:

- afmetingen, vorm en dichtheid granulair materiaal
- opening G
- snelheid en schuifspanning boven het blok

Van minder belang wordt de afstand W tussen de gaten geacht.

Als voorbereiding op de prototype metingen zijn in een stroomgoot blokken met een opening van $G = 0,01276$ m neergelegd en gevuld met zand met een mediane diameter van 1,5 mm. De blokken werden belast met een schuifspanning van 22,5 N/m² en een stroomsnelheid van 1,524 m/s. De gemiddelde diepte van de erosie kuil bedroeg 0,0106 m (= 0,83 G). Parsons en Apmann vinden dit redelijk overeen komen met hun aanname dat de maximale diepte van de erosiekuil gelijk is aan 1,0 G .

Rockwell en Knisely [3]

Rockwell en Knisely bekijken wervels in een gat als gevolg van stroming erboven. De nadruk van hun onderzoek ligt op de krachten op de wanden die in deze configuratie kunnen optreden. De volgende opmerkingen, in relatie met het huidige onderzoekskader, zijn hierbij van belang:

- Ze werken met $Y = 0,076$ m en $G = 0,089$ m. ($Y/G = 0,854$) en beschouwen geen erosie proces. De snelheid boven het gat bedraagt $u = 0,525$ m/s.
- De turbulentie en de daarbij opgewekte schuifspanning nemen toe bij kleiner wordende verhouding Y/G .
- In het gat treedt 1 wervel op.
- In figuur 26 zijn enkele snelheidsprofielen gegeven. Zij merken op dat het overgangsgebied van het snelheidsprofiel in relatie met de gatdiepte Y

klein is en dat de maximaal optredende (tangentele) snelheid in de opgewekte wervel (u_w) ongeveer een vierde is van de snelheid boven het gat ($u_w = 1/4 u$).

Ethembaoglu [4]

Ethembaoglu onderzoekt, gelijk aan het onderzoek beschreven in [3], de krachten op de wanden in een gat als gevolg van een stroming boven dat gat. De nadruk ligt daarbij op de frequenties die optreden in de wervels. Voor het huidige onderzoek zijn slechts de volgende zaken van belang:

- De karakteristieke parameters van de wervel blijken meer van de opening G dan van de gatdiepte Y af te hangen.
- Verschillende configuraties worden onderzocht. Hierbij varieert Y/G tussen 0,286 en 2,0. De diepte van het gat bedraagt $Y = 0,10$ m. De snelheden u variëren tussen 5,5 m/s en 7,0 m/s. In figuur 27 zijn enkele snelheidsprofielen gegeven.
- Het aantal wervels dat optreedt hangt af van de verhouding Y/G . In onderstaande tabel is dit aangegeven.

| Y/G | aantal wervels | opmerkingen |
|---------------|----------------|---|
| > 1,25 | 1 | |
| 0,833 - 1,25 | 1 | 2-dimensionaal |
| 0,667 - 0,883 | 2 | |
| 0,5 - 0,667 | 2 | langgerekt |
| 0,286 - 0,333 | 2 | lengte wervel blijft constant = 0,19 m = 1,9 Y |

In figuur 27b zijn deze wervels schematisch aangegeven.

- De relatie tussen u boven het gat en de snelheid in het overgangsgebied tussen stroming in het gat en daarboven is voor $Y/G < 0,667$ gelijk aan $0,5 \cdot u$. Dit betekent dat de snelheid u_w in het gat ongeveer 0 is (zie figuur 27).

- Voor waarden van $Y/G > 0,667$ is de maximale snelheid in het overgangsgebied kleiner dan $0,5 u$. Dit betekent dat de snelheid u_w in het gat ongeveer $0,25 u$ bedraagt, wat dan meer overeenkomt met de resultaten van het onderzoek beschreven in [3]. Verder wordt opgemerkt dat de snelheid u_w sterk afhankelijk is van enerzijds de verhouding tussen de lengte G en de dikte van de grenslaag en anderzijds de verhouding Y/G .

Page [5]

Page heeft onderzoek gedaan naar erosie door stroming in open gaten van zogenaamde seabees (figuur 1) met verschillende diameters G en diepten Y ($0,8 < \frac{Y}{G} < 2,0$). De waterdiepte h varieerde tussen $0,163$ m en $0,22$ m en de snelheden boven de gaten varieerde tussen $u = 0,44$ m/s en $u = 1,33$ m/s.

Hij concludeert dat de blokken zorgen voor een vertraging van het erosieproces en dat de parameter Y/G hierbij een belangrijke rol speelt (zie figuur 28). Bij toenemende Y/G zal het erosieproces steeds verder vertraagd worden. Hij maakt tevens onderscheid in sterk gegradeerd materiaal en zwak gegradeerd materiaal. Het onderzoek leert dat het sterk gegradeerde materiaal beter bestand is tegen erosie dan het zwak gegradeerde materiaal (het erosie proces vertraagt en treedt in mindere mate op). De D_{50} is een goede maat voor de korrelgrootte van het materiaal.

Brown [19]

Brown heeft in [19] een tabel gepresenteerd met resultaten van Hansen en Keats en Page. Hierin bekijkt hij de erosie van materiaal, dat zich in cellen van een bekleding bevindt, onder invloed van over het talud stromende water. In figuur 29 zijn de snelheden boven het gat aangegeven waarbij materiaal uit het gat verdwijnt. Uit de proeven blijkt dat reeds bij een kleine snelheid over het talud (orde 1 m/s) uitspoeling optreedt, ook al is de gatdiepte veel groter dan de gatbreedte. Hij geeft ook een formule voor het begin van uitspoeling.

Rodi [6]

Rodi heeft onderzoek gedaan naar turbulentie. In [6] beschrijft hij de resultaten ervan. Voor het onderhavige onderzoek is figuur 30 van belang, waarin hij snelheidsmetingen presenteert boven en in een gat.

Uit de figuur volgt dat de verhouding u_w/u een waarde van circa 0,25 aanneemt. Rodi vermeldt verder geen geometrische waarden.

Morris [9]

Morris heeft zich gericht op de spleten tussen de flenzen van rioolbuizen en daarbij gekeken naar snelheden die optreden in deze openingen welke daartoe waren geschematiseerd tot strips. Voor de verhouding tussen de snelheid boven het gat en de snelheid in het overgangsgebied tussen stroming in het gat en daarboven vindt hij waarden van 0,375 à 0,75. De snelheid in het gat blijkt nog een faktor 0,5 à 1 lager te zijn. Voor de snelheid in de wervel geldt dan bij benadering:

$$u_w/u \approx 0,20 \text{ à } 0,75$$

waarbij de genoemde waarden uitersten zijn.

Derks [22]

De invloed van het verhang op de erosie is door Derks onderzocht [22]. De modelopstelling bestond uit een bodem van zand ($D_{50} = 0,135$ mm), daarop een geotextiel ($O_{90} = 0,20$ mm) en gobi-blokken (figuur 2). Erosie trad op bij een superkritische stroming van $u = 5,3$ m/s en een waterdiepte van 1,25 m. Vervolgens is een proef uitgevoerd met een dicht caisson op de blokken, zodat het water tussen de nokjes op de blokken en tussen spleten moest stromen (doorstroomoppervlak is 12% van totaal). Er bleek bij deze proef al erosie op te treden bij een poriesnelheid van 0,5 m/s en een verhang van 20%. Met andere woorden het verhang heeft een grote invloed.

2.3.2 Conclusies literatuuronderzoek erosie

Op basis van de hiervoor beschreven literatuur met betrekking tot de snelheden u_w en eventuele erosie van materiaal in een gat kunnen nu de volgende conclusies worden getrokken:

- Ten aanzien van de wervels en de daarmee samenhangende snelheden u_w in de wervel is voor de verschillende situaties in onderstaande tabel de waarde voor u_w/u bijeengezet.

| Y_{max} (m) | G (m) | B (m) | Y/G (-) | aantal wervels (-) | u (m/s) | u_w/u (-) | lit. (-) |
|------------------|-----------|----------|------------|--------------------------|------------|----------------|-------------|
| 0,30 | 0,60 | - | 0,5 | 1 | 1,8 -6,5 | 0,20-0,40 | [1] |
| 0,102 | 0,051 | 0,0794 | 2,0 | 1 | 2,22-2,56 | n.v. | [2] |
| 0,0106 | 0,013 | 0,013 | 0,83 | 1 | 1,524 | n.v. | [2] |
| 0,076 | 0,089 | - | 0,854 | 1 | 0,525 | 0,25 | [3] |
| 0,10 | var. | - | 0,286-2,0 | 1-2 | 5,5 -7,0 | 0,25 à 0,50 | [4] |
| 0,19-0,37 | 0,10-0,33 | - | 0,8-2,0 | | 0,44-1,33 | n.v. | [5] |
| - | - | - | - | - | - | 0,25 | [6] |
| - | - | - | - | - | - | 0,20-0,75 | [9] |

Uit de tabel volgt dat de verhouding u_w/u met uitzondering van [9] tussen de 0,20 en 0,50 ligt en onafhankelijk is van de parameters Y/G in het gebied $0,25 < Y/G < 2,0$.

De hoge waarde volgend uit het onderzoek van Morris [9] wordt waarschijnlijk veroorzaakt, doordat hij snelheden heeft beschouwd tussen strips. Ten opzichte van de andere onderzoeken, waarbij sprake was van een enkel gat, is de onderlinge afstand van die strips relatief groot. De literatuurresultaten stemmen goed overeen met door Booi bepaalde waarden voor de stroomsnelheden in havenbekkens als functie van de riviersnelheid [7] behalve voor Morris [9]. Theoretisch leidt hij een waarde af van $u_w/u = 0,3$ à $0,4$, terwijl metingen resulteren in $u_w/u = 0,25$.

- Voor wat betreft de erosie verschaffen [1], [2], [19] en [22] de meeste informatie.

In [2] worden waarden gegeven voor de evenwichtsdiepte. Zij spreken van waarden van $(0,8$ à $1,0)*G$ voor erosie van zand. In [1] wordt geen melding gemaakt dat de evenwichtsdiepte bereikt wordt. In dit laatste geval is de diepte tot aan het granulaire materiaal wel kleiner dan $(0,8$ à $1,0)*G$. In [19] is zelfs bij grotere gatdiepte dan de gatbreedte nog sprake van uitspoeling. Wordt de proef van Parsons en Apmann [2] nagerekend met de formule van Brown [19], dan blijkt dat Brown een 1,5 maal grotere erosiediepte voorspelt dan is gemeten bij een $u = 1,524$ m/s. Anders gezegd: voor $Y/G = 0,83$ is de toelaatbare kritieke stroomsnelheid $u = 1,2$ m/s. Gekonkludeerd kan worden dat de verschillen aanzienlijk kunnen zijn

en dat de invloed van u en Y/G groot is. Mogelijk speelt ook het verschil in talud een rol. Brown beschrijft een stroming talud af, terwijl Parsons en Apmann een vlakke bodem hebben beschouwd. Tenslotte is het optredende verhang blijkens [22] relevant.

2.3.3 Voorspelling van stroming en erosie in gat

Met gegevens uit [1] is er een eenvoudig rekenmodel opgezet. Hierbij worden twee situaties beschouwd:

- een ontwikkeld logarithmisch snelheidsprofiel
- een niet ontwikkeld snelheidsprofiel.

logarithmisch snelheidsprofiel

Veronderstel dat vlak bij de bodem (in het gat, zie figuur 23) een logarithmisch snelheidsprofiel aanwezig is over een hoogte van $h = 0,05$ m. In figuur 26 is te zien dat dit aannemelijk is. Dit komt dan overeen met 0,17 Y . Op enige hoogte boven de bodem in het gat is te zien dat $\delta u / \delta z$ bij $z = h = 0,05$ m (hetgeen bepalend is voor τ) nagenoeg nul is. Hieruit is af te leiden dat op deze hoogte een fiktieve waterspiegel is aan te leggen.

Bij een hydraulisch ruwe wand ($Re_* > 70$) zijn dan de volgende parameters te geven:

$$\begin{aligned} C &= 18 \log (12 h / k_s) && (m^{1/2}/s) && (2.22) \\ \tau &= \rho g u^2 / C^2 && (N/m^2) \\ u_* &= \sqrt{\tau / \rho} && (m/s) \\ \psi &= \tau / (\rho g \Delta D_{50}) && (-) \\ Re_* &= u_* k_s / \nu && (-) \\ Re &= u h / \nu && (-) \end{aligned}$$

waarin:

$$\begin{aligned} D_{50} &= \text{karakteristieke materiaalparameter} && (m) \\ \nu &= \text{kinematische viscositeit} = 10^{-6} && (m^2/s) \\ k_s &= \text{equivalente ruwheid} = 1,5 D_{50} && (m) \\ C &= \text{coefficient van Chezy} && (m^{1/2}/s) \\ \tau &= \text{schuifspanning} && (N/m^2) \\ u_* &= \text{schuifspanningsnelheid} && (m/s) \\ \rho &= \text{dichtheid water} && (kg/m^3) \\ \Delta &= \text{relatieve dichtheid} && (-) \end{aligned}$$

- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)
 h = hoogte (m)
 Re = Reynoldsgetal betrokken op u, h en v (-)
 Re* = Reynoldsgetal betrokken op u*, k_s en v (-)
 u = stroomsnelheid boven gat (m/s)

Met behulp van deze formules zijn een aantal berekeningen gemaakt, waarvan in onderstaande tabel de resultaten bijeen gezet zijn.

| waargenomen in [1] | | | berekend | | | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------|----------------------------|------------------------|----------|------------|-------------------|-----------|
| D ₅₀ (mm) | u _w m/s | erosie*) | C (m ^{1/2} /s) | Re .10 ³ | ψ (-) | Re* (-) | φ (-) | erosie**) |
| 3 | 0,4 | w | 38,2 | 200 | 0,02 | 98 | 10 ⁻⁶ | -- |
| 3 | 0,7 | w | 38,2 | 35 | 0,07 | 171 | 10 ⁻² | + |
| 9 | 0,4 | b | 29,6 | 20 | 0,01 | 380 | 10 ⁻⁵ | -- |
| 9 | 0,6 | b | 29,6 | 30 | 0,03 | 570 | 10 ⁻⁴ | - |
| 9 | 1,2 | w | 29,6 | 60 | 0,11 | 1140 | 10 ⁻² | + |
| 9 | 1,8 | w | 29,6 | 90 | 0,24 | 1710 | 10 ⁻² | + |
| 10 | 0,5 | b | 28,8 | 25 | 0,02 | 543 | 10 ⁻⁵ | -- |
| 10 | 0,8 | b | 28,8 | 40 | 0,05 | 869 | 10 ⁻³ | + |
| 20 | 1,5 | w | 23,4 | 75 | 0,12 | 4012 | 10 ⁻² | + |
| 20 | 2,1 | w | 23,4 | 105 | 0,24 | 5618 | >10 ⁻² | ++ |
| 20 | 1,0 | b | 23,4 | 50 | 0,05 | 2675 | 10 ⁻⁴ | - |
| 20 | 1,4 | b | 23,4 | 23,4 | 0,10 | 3745 | 10 ⁻³ | + |
| 45 | 1,8 | w | 17,0 | 90 | 0,14 | 14856 | 10 ⁻² | + |
| 45 | 2,5 | w | 17,0 | 125 | 0,28 | 20634 | >10 ⁻² | ++ |

*) b = stenen bewegen

**) zie [29]

w = stenen worden uit gat weggeslingerd

De volgende opmerkingen kunnen hierbij gemaakt worden:

- Voor de stroomsnelheid u_w wordt de gemeten waarde u_w gehanteerd, zoals oorspronkelijk door Führböter gepresenteerd in [1].
- De hoogte h waarover het logaritmisch snelheidsprofiel wordt aangenomen is h = 0,17 Y.

- Hydraulisch ruw ($Re_* > 70$) voor alle situaties.
- Met behulp van de relatie van Paintal [29] [8]:

$$\phi = 1,64 \cdot 10^{10} \cdot \psi^{11}$$

zijn waarden voor ϕ te bepalen. De ϕ geeft een indicatie van het transport. Wordt deze vergeleken met het werkelijk opgetreden transport dan blijkt uit bovenstaande tabel dat de tendenzen goed worden weergegeven door de berekeningen.

Op basis van de gegevens van het modelonderzoek uit [2] kan in principe een zelfde exercitie worden uitgevoerd. Dit leidt echter tot problemen omdat het logaritmisch snelheidsprofiel pas geldt vanaf $z > 3$ à $4 k_s$, wat overeenkomt met $z = 0,0067$ à $0,009$ ($k_s = 1,5 \cdot D_{50}$ met $D_{50} = 0,0015$ m). Dit komt overeen vervolgens met $z = 0,63$ à $0,85 \cdot Y$. Dit is groter dan $0,5 Y$ en daar geldt niet meer $\partial u / \partial z = 0$.

Tenslotte zijn ook de resultaten van modelonderzoek die door Brown in [19] zijn beschreven, nagerekend met het boven gegeven rekenmodel. De overeenstemming tussen berekening en meting lijkt redelijk te zijn. Bij begin van uitspoeling varieert de berekende waarde van ψ van $0,02$ tot $0,05$ (bij toenemende korrel-grootte), terwijl volgens Shields ψ_s ongeveer $0,035$ à $0,045$ zou moeten zijn.

niet ontwikkeld snelheidsprofiel

Indien er vanuit gegaan wordt, dat in het gat het snelheidsprofiel zich niet aan de ruwheid heeft kunnen aanpassen (met andere woorden er is geen sprake van een logaritmisch snelheidsprofiel), kan met behulp van de schuifspanning onder golven hier iets over gezegd worden [21]:

$$\tau_w = 0,5 f_w \rho u^2 \quad (2.23)$$

waarin:

$$f_w = \exp(-5,977 + 5,313 (a_b/r)^{-0,194}) \quad (2.24)$$

met:

- f_w = coefficient (-)
 r = bodemruwheid (m)
 a_b = amplitude van waterbeweging nabij bodem (m)

De gegevens uit [1] waarvoor geldt $D_{50} = 0,02$ m en $U_w = 1,5$ m/s worden hier gebruikt om een en ander na te gaan.

Neem voor a_b de grootte van het gat, $a_b = 0,60$ m, en voor r de diameter van de korrels in het gat, $r = 0,02$ m. Na invulling volgt voor $f_w = 0,03$. Na invulling volgt bij $u = 1,5$ m/s voor τ_w :

$$\tau_w = 0,5 \cdot 0,03 \cdot 1000 \cdot 1,5^2 = 33,75 \text{ N/m}^2$$

Substitutie hiervan in de relatie voor ψ levert op:

$$\psi = \tau / (\rho g \Delta D_{50}) = 0,10$$

Bij een ontwikkeld snelheidsprofiel werd een waarde van $\psi = 0,12$ berekend, waaruit volgt dat beide berekeningen nagenoeg dezelfde waarde opleveren. De benaderingen voorspellen beide dat er een grote mate van transport zal optreden.

De hiervoor gegeven theoretische beschouwingen hebben betrekking op erosie op de bodem van het gat. Nagegaan dient te worden in hoeverre materiaal, dat in de wervel is opgenomen, ook daadwerkelijk het gat kan verlaten. Hiertoe wordt de valsnelheid van het materiaal (w) vergeleken met de watersnelheid (u_w) in de wervel. In de navolgende tabel zijn deze beide waarden voor hiervoor beschreven situaties waarbij erosie optrad bijeengezet. Hierbij is voor de verticale snelheid in de wervel een waarde aangenomen gelijk aan de hiervoor gehanteerde snelheid in de wervel. De valsnelheid wordt bepaald met:

$$w = \left\{ \frac{(4 \Delta D_{50} g)}{3 C_d} \right\}^{0,5} \quad (2.25)$$

waarin C_d een weerstandscoefficient is. C_d is afhankelijk van Re en kan met de volgende formule worden afgeschat:

$$C_d = \frac{24}{Re}$$

Voor de onderhavige situatie is C_d ongeveer gelijk aan $C_d = 0,7$.

| literatuur | D_{50} (mm) | w (m/s) | u_w (m/s) |
|------------|------------------|------------|----------------|
| [1] | 3 | 0,30 | 0,4 - 0,7 |
| [1] | 9 | 0,52 | 1,2 - 1,8 |
| [1] | 20 | 0,78 | 1,5 - 2,1 |
| [1] | 45 | 1,17 | 1,8 - 2,5 |

Uit de tabel volgt dat u_w in alle gevallen groter is dan de valsnelheid van het materiaal, waaruit gekonkludeerd kan worden dat erosie en uitspoeling uit het gat op kunnen treden.

Om de invloed van een aantal relevante parameters op de schuifspanningsparameter ψ (vgl. 2.22) na te gaan, is voor een tweetal situaties ψ uitgezet als functie van de gatdiepte Y en de snelheid u boven de toplaag (zie figuur 31). Uit de figuur valt af te lezen dat bij kleine waarden voor Y , ψ afhankelijk is van Y .

Tenslotte moet worden opgemerkt dat de voorgaande beschouwingen gelden voor een vlakke horizontale bodem. De bodemligging in een gat in de evenwichtssituatie (dus na uitspoeling) is hiermee vergelijkbaar, ook al is er sprake van een open bekleding op een talud. Een correctie om de taludinvloed in rekening te brengen is dus niet nodig. Wel kan de bodem als gevolg van de cirkelvormige wervel scheef liggen, omdat de uitgeoefende schuifspanningen in het hart van het gat groter zijn dan aan de randen van het gat.

2.3.4 Grondwaterstroming

In situaties waarin sprake is van een hogere grondwaterspiegel dan de waterstand in de vaarweg, stroomt er grondwater naar de vaarweg toe. Deze situatie treedt ook op door de verlaging van de waterstand gedurende de passage van een schip. Daarnaast kan er sprake zijn van tijdelijke overdrukken in de ondergrond. Deze situatie treedt op bij passage van de haalgolf. Tijdens metingen van het drukverloop onder een toplaag van gezette steen zijn deze overdrukken in de vorm van drukpieken geregistreerd, die resulteren in uitstroming van grondwater.

De grondwaterstroming (aangedreven door een verhang i_{\perp} loodrecht op het grensvlak) heeft invloed op de stabiliteit van het korrelmateriaal. In [10] is de factor k_2 afgeleid waarmee de kritieke schuifspanning voor een horizontaal grensvlak zonder verhang loodrecht op dat grensvlak aangepast kan worden voor een grensvlak met loodrecht verhang. Met de volgende formule kan k_2 worden afgeschat:

$$k_2 = 1 - \frac{i_{\perp}}{\Delta (1-n)} \quad (2.28)$$

waarin:

k_2 = verhouding tussen de kritieke schuifspanning met
en zonder de invloed van de stromingscomponent i_{\perp} (-)

n = porositeit (-)

i_{\perp} = verhang loodrecht op grensvlak (-)

De kritieke schuifspanning voor een dergelijke situatie wordt nu:

$$\tau_{cr} = k_2 \tau \quad (2.29)$$

waarin:

τ_{cr} = kritieke schuifspanning met $i_{\perp} \neq 0$ (N/m²)

τ = kritieke schuifspanning met $i_{\perp} = 0$ (N/m²)

De factor k_2 beschrijft de invloed op de schuifspanning voor stroming evenwijdig aan het grensvlak (zie [11]).

Tezamen met een taludkorrektiefactor k_1 volgens:

$$k_1 = \cos(\alpha) \left(1 - \frac{\tan^2(\alpha)}{\tan^2(\theta)}\right)^{0.5}$$

waarin:

α = taludhelling (°)

θ = hoek van inwendige wrijving (°)

volgt voor de kritieke schuifspanning:

$$\tau_{cr} = k_1 k_2 \tau \quad (2.30)$$

waarin:

- τ_{cr} = kritieke schuifspanning rekening houdend met stroming
evenwijdig aan grensvlak en evenwijdig aan kanaalas (N/m²)
- τ = kritieke schuifspanning voor $i_{\perp} = 0$ (N/m²)

Opgemerkt wordt dat er alleen uitspoeling optreedt wanneer de valsnelheid kleiner is dan de snelheid in het gat.

case-study

Ter illustratie van het voorgaande is een case-study opgezet voor een situatie waarin een oeververdediging met talud $\cot(\alpha) = 4$ wordt belast door een scheepsgeïnduceerde waterbeweging, in het bijzonder de waterspiegeldaling H. Doelstelling van de case-study is aan te tonen dat de invloeden van i_{\perp} en taludhoek α op de waarde van τ_{cr} , niet groot zijn.

Als gevolg van een waterspiegeldaling zullen er over de toplaag verhangen ontstaan die stroming door de gaten kunnen veroorzaken. Met de volgende formule is deze stroomsnelheid in een gat te bepalen (zie appendix 1):

$$u_g = k' \ell i_t \quad (2.31)$$

- u_g = snelheid in gat (m/s)
- k' = doorlatendheid van toplaag (m/s)
- ℓ = geometrie-parameter (quotiënt van blokoppervlak en gatoppervlak) (-)
- i_t = verhang over toplaag (m)

Verondersteld wordt dat in de onderhavige situatie de volgende relatie kan worden gehanteerd om $\Delta(\phi)$ te bepalen [11]:

$$\frac{\Delta(\phi)}{H} = \frac{\lambda_*}{2H} (1 - e^{-2H/\lambda_*}) \quad (2.32)$$

waarin:

- $\Delta(\phi)$ = verval over de toplaag (m)
- H = waterspiegeldaling (m)
- λ_* = leklengte (m)

Voor λ_* kan voor een situatie van blokken op zand de volgende niet getoetste relatie gehanteerd worden (zie [11]):

$$\lambda_* = \frac{k}{k'} D \sin(\alpha) \quad (2.32)$$

waarin:

k = doorlatendheid ondergrond (m/s)

k' = doorlatendheid toplaag (m/s)

In appendix 1 wordt aangegeven op welke wijze een schatting kan worden gemaakt voor de doorlatendheid van blokken met grote gaten. De doorlatendheidsrelaties worden hier gegeven:

$$k' = \frac{D k}{L_e + BL (D-Y)/A_g} \quad (2.34)$$

met:

$$L_e = - \frac{\sqrt{BL}}{\pi} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi \sqrt{A_g}}{2\sqrt{BL}}\right)\right) \quad (2.35)$$

Voor een waterspiegeldaling van $H = 1,0$ m zijn de volgende afschattingen te maken. Voor blokken met gaten van $G = 0,40$ m; $B = 0,40$ m, $D = 0,40$ m op een talud met $m = 4$ op zand met een $D_{50} = 0,150$ mm ($k = 10^{-4}$) en $n = 0,4$ resulteert na invulling in de gegeven formules:

$$L_e = 0,04 \quad (\text{m})$$

$$k' = 1,7 \cdot 10^{-4} \quad (\text{m/s})$$

$$\lambda_* = 0,07 \quad (\text{m})$$

$$\Delta(\phi) = 0,04 \quad (\text{m})$$

$$u_g = 1,43 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m/s})$$

Het verhang i_1 over de bovenste laag zand onder de toplaag is nu als volgt te berekenen:

$$i_1 = \frac{u_g}{k} \quad (2.36)$$

waarin:

u_g = filtersnelheid in zand direkt onder het gat (m/s)

Na invulling volgt voor i_{\perp} een waarde van $i_{\perp} = 0,14$.

De invloed van de taludhelling voor stroming evenwijdig aan de kanaalas op de kritieke schuifspanning kan worden ingevoerd met de factor k_1 . Deze is voor de hier beschouwde situatie:

$$k_1 = 0,98$$

De invloed van het toestromende water als gevolg van de waterspiegeldaling kan, ook via de kritieke schuifspanning, worden ingebracht met de factor k_2 . Voor deze waarde volgt na invulling:

$$k_2 = 0,86$$

Hierbij dient natuurlijk rekening te worden gehouden met de hier aan ten grondslag liggende aannamen.

De kritieke schuifspanning wordt nu:

$$\tau_{cr} = k_1 k_2 \tau = 0,84 \tau \quad (2.37)$$

met

$$\begin{aligned} \tau &= \psi \rho g \Delta D_{50} && (\text{N/m}^2) \\ \psi &= 0,04 \text{ (begin van beweging)} && (-) \end{aligned}$$

Gekonkludeerd kan worden dat in dit voorbeeld de invloeden van i_{\perp} en de taludhelling τ_{cr} reduceren met 16% ten opzichte van τ voor $\tau_b = 0$.

De hiervoor gegeven beschouwing heeft betrekking op de waterspiegeldaling. De belasting welke door de haalgolf in de vorm van de taludvolgstroom wordt geïnduceerd kan met behulp van de relaties voor stroming worden nagegaan.

2.4 Konklusies ten aanzien van oevers

Op basis van de bureaustudie naar erosie door open oeverbekledingen kunnen de volgende konklusies getrokken worden:

- De ruwheid is voor $Y = W$ globaal te schatten met een relatie afgeleid uit de literatuur over ruwheidselementen op een vlakke bodem (formule 2.16 t/m 2.18) . Over de ruwheid van een bodem met gaten, die als extreem voorbeeld van een vlakke bodem met tegen elkaar geplaatste ruwheidselementen gezien kan worden, is in de literatuur geen informatie beschikbaar. Een modelonderzoek naar de ruwheid van Armorflex-blokken resulteerde in een waarde van $k_s = 0,02$ m, welke waarde ook hier kon worden voorspeld met boven bedoelde relatie. Hieruit is gekonkludeerd dat de formules toepasbaar zijn.
- Als de gatgrootte en gatdiepte ongeveer gelijk zijn, dan treedt er een neer op met een snelheid die ongeveer gelijk is aan een kwart tot een derde van de snelheid boven de toplaag. De spreiding in de gegevens uit de literatuur is echter groot. Bij diepere gaten treden meerdere neren boven elkaar op met naar beneden afnemende snelheid.
- Ten aanzien van de erosie konkluderen Parsons and Apmann dat de evenwichts-diepte ongeveer gelijk is aan de gatbreedte ($u = 1,5$ m/s en $D_f = 1,5$ mm). Brown beschrijft proeven met $D_f = 0,3$ mm tot 1,5 mm. Hij vindt een 1,5 keer grotere evenwichtsdiepte dan Parsons and Apmann (bij $u = 1,5$ m/s). Mogelijke oorzaak van deze verschillen is de taludinvloed.
- Het gepresenteerde rekenmodel, gebaseerd op het erosie-kriterium van Shields, geeft resultaten die in de buurt komen van de metingen. De metingen zijn echter ongeschikt om harde konklusies op te baseren.

Opgemerkt moet worden dat bij de beschouwingen is aangenomen dat de waterbeweging vlak boven de toplaag (orde 10 cm) wordt bepaald door de retourstroom en de haalgolf enerzijds en de ruwheid anderzijds.

Samenvattend moet worden gekonkludeerd dat de literatuur onvoldoende informatie verschaft over de erosie van materiaal in gaten van open taludbekledingen op oevers. Modelonderzoek kan een waardevolle aanvulling opleveren. Aanbevelingen hiervoor zijn gedaan in Appendix II (paragraaf 2).

3. Open taludbekledingen op dijken

3.1 Inleiding

Golfaanval op een relatief open dijkbekleding kan uitspoeling van het onderliggende filtermateriaal veroorzaken, mits de openingen groter zijn dan de filterkorrels. De belasting op dijken is doorgaans aanzienlijk zwaarder dan op oevers, waardoor een toplaag direct op zand of teelaarde buiten beschouwing kan blijven. Er zijn twee bezwijkmechanismen mogelijk, die elkaar ook kunnen versterken:

1. Erosie als gevolg van het door de toplaag uittredende water.
2. Erosie als gevolg van het over het talud stromende water tijdens golfoploop of -neerloop en de golfklap.

Het eerste mechanisme treedt op ten tijde van een maximaal teruggetrokken golf. De verschildruk over de toplaag veroorzaakt dan een stroming uit het talud die filterkorrels kan meenemen. Bij een toplaag met relatief kleine gaten ten opzichte van de toplaagdikte (bv.: $D/G > 3$), die niet zijn gevuld met filterkorrels, is dit het enige bezwijkmechanisme. Een voorbeeld van een dergelijke constructie is Basalton (figuur 11).

Het tweede bezwijkmechanisme dreigt tijdens en vlak na de golfklap als er water met grote snelheid over het talud stroomt. Dit mechanisme is maatgevend als de gaten relatief groot zijn ten opzichte van de toplaagdikte (bv.: $G/D > 1$). Een voorbeeld van een dergelijke constructie is een talud met Seabees. (figuur 1).

In onderstaande paragrafen worden eerst dijkbekledingen met kleine gaten beschouwd (beziijkmechanisme 1) en vervolgens die met grote gaten (beziijkmechanisme 2). Deze laatste worden behandeld aan de hand van het schema van figuur 14.

3.2 Dijkbekledingen met kleine gaten

3.2.1 Afschatting van optredende belasting

Op basis van de eis dat de filterkorrels pas mogen uitspoelen als ook de zetting op het punt staat te bezwijken, is het mogelijk de optredende snelheid in een gat in de bekleding te schatten. De aandacht wordt gericht op bekledingsconstructies met de volgende eigenschappen:

1. Dikte top laag $0,15 < D < 0,4 \text{ m}$
2. Gatdiameter $0,01 < G < 0,05 \text{ m}$
3. Korrelgrootte van filter $5 < D_f < 50 \text{ mm}$
4. Porositeit van het filter $n = 0,4$

Vanwege de te verwachten turbulente stroming in het filter is de stroming in het gat als volgt afhankelijk van het verval over de top laag:

$$v_t = k' \cdot \sqrt{\frac{\phi_t}{D}} \quad (3.1)$$

met:

- v_t = specifiek debiet door de top laag (m/s)
- k' = doorlatendheid top laag (m/s)
- ϕ_t = verval over de top laag (m/s)
- D = dikte van de top laag (m/s)

De maximale snelheid in het gat treedt op als de top laag dreigt te bezwijken:

$$\phi_{tmax} = \Gamma_s \cdot \Delta_s \cdot D \cos \alpha \quad (3.2)$$

met:

- Γ_s = invloedsfaktor op de sterkte van de top laag als gevolg van wrijving en traagheid van de blokken [25] (-)
- Δ_s = relatieve soortelijke massa van de top laag ($\Delta = \rho_s / \rho - 1$) (-)
- ρ_s = soortelijke massa van de steen (kg/m³)
- ρ = soortelijke massa van water (kg/m³)
- α = taludhelling (°)

Met formule (3.1) en (3.2) is de snelheid in het gat op het moment dat de top laag bezwijkt te bepalen:

$$u_g = v_t \cdot l = l \cdot k' \cdot \sqrt{\Gamma_s \cdot \Delta_s \cdot \cos \alpha} \quad (3.3)$$

met:

- u_g = snelheid in gat als gevolg van uittredend debiet.
- l = geometrie-parameter = quotiënt van blokkoppervlak en gatoppervlak (-)

In [26] is een formule afgeleid voor toplagen met gaten van één grootte en gelijke onderlinge afstand (hier weergegeven met $a_g = b_g = 0$):

$$k' = \frac{-a' + \sqrt{(a')^2 + 4 b'}}{2b'} \quad (3.4)$$

$$a' = \frac{a_f}{D} \cdot \sqrt{\frac{B'L'}{4\pi}} \cdot \left(\frac{\sqrt{B'L'/\pi}}{2 r_{\min}} - 2 \right) \quad (3.5)$$

$$b' = \frac{\ell^2}{2GD} \left(\left(\frac{1}{n} - 1 \right)^2 + 1 \right) + \frac{b_f}{D} \cdot \sqrt{\frac{B'L'}{4\pi}} \left(3 \left(\frac{\sqrt{B'L'/\pi}}{2 r_{\min}} \right)^3 - 4 \right) \quad (3.6)$$

met:

| | | | |
|------------|---|--|-----------------------------------|
| r_{\min} | = | $\max \left(\frac{1}{2} D_{f15}; 0,4 \sqrt{A_g} \right)$ | |
| ℓ | = | $B'L'/A_g$ | |
| B' | = | gatafstand in breedte-richting (hart op hart) | (m) |
| L' | = | gatafstand in lengte-richting (hart op hart) | (m) |
| A_g | = | gatoppervlak | (m ²) |
| g | = | zwaartekrachtsversnelling | (m/s ²) |
| D_{f15} | = | karacteristieke korrelgrootte van filter | (m) |
| a_f | = | lineaire weerstandskoefficient van filter | (s/m) |
| b_f | = | kwadratische weerstandskoefficient van filter | (s ² /m ²) |
| a' | = | lineaire weerstandskoefficient van toplaag | (s/m) |
| b' | = | kwadratische weerstandskoefficient van toplaag | (s ² /m ²) |
| n | = | porositeit van filter = deel van de ruimte die niet door grind wordt ingenomen | (-) |

In bovenstaande formule is er aangenomen dat er geen gatvulling of geotextiel aanwezig is. Als het filter grof is, dan heeft de doorlatendheid van het filter en de toplaag een turbulent karakter. Er geldt dan bij benadering:

$k' = \sqrt{1/b'}$ en $v_t = k' \cdot \sqrt{\phi_t/D}$. In figuur 32 is voor diverse combinaties van toplagen en filtermaterialen een indruk gegeven van het bereik waarbinnen $k' \cdot \ell$ varieëren. Het blijkt dat:

- als $D_{f15} = 10$ mm: $0,3 < k' \cdot \ell < 0,9$ m/s
- als $D_{f15} = 30$ mm: $0,4 < k' \cdot \ell < 1,1$ m/s
- als $D_{f15} = 50$ mm: $0,6 < k' \cdot \ell < 1,3$ m/s

Met $1 < \Gamma_s < 2$ (zie [26]) en $1,2 < \Delta_s < 1,5$ en $0,9 < \cos\alpha < 1$ kan het bereik van de snelheid in het gat berekend worden:

$$u_g = \ell k' \sqrt{\Gamma_s \Delta_s \cos\alpha} \quad (3.7)$$

- als $D_{f15} = 10 \text{ mm}$: $0,3 < u_g < 1,5 \text{ m/s}$ (3.8)

- als $D_{f15} = 30 \text{ mm}$: $0,4 < u_g < 1,9 \text{ m/s}$ (3.9)

- als $D_{f15} = 50 \text{ mm}$: $0,6 < u_g < 2,2 \text{ m/s}$ (3.10)

3.2.2 Lokale fluïdisatie

In de vorige paragraaf is aangetoond dat de stroomsnelheid (vlak vóór de top-laag bezwijkt) minimaal 0,3 m/s bedraagt (zie vgl. (3.8 t/m 3.10)). Het verhang over de bovenste korrels recht onder een gat is dan als volgt te berekenen:

$$u_g = v_f = k \sqrt{i} \quad (3.11)$$

i = verhang (-)

v_f = filtersnelheid direkt onder het gat (m/s)

$$i = \left(\frac{v_f}{k}\right)^2$$

$v_f > 0,3 \text{ m/s}$ $i \gg 1$

$k < 0,1 \text{ m/s}$

Er mag daarom verwacht worden dat er fluïdisatie optreedt bij die korrels die niet onder invloed van een bovenbelasting staan. Dit geldt globaal voor de korrels direkt onder het gat.

Deze korrels zullen zich zodanig her rangschikken dat de porositeit toeneemt. Dit hoeft nog niet te betekenen dat de korrels uitspoelen.

Voor het geval dat de korrel(s) direkt onder het gat groter zijn dan het gat, treedt er uiteraard geen fluïdisatie op.

3.2.3 Lanceermechanisme

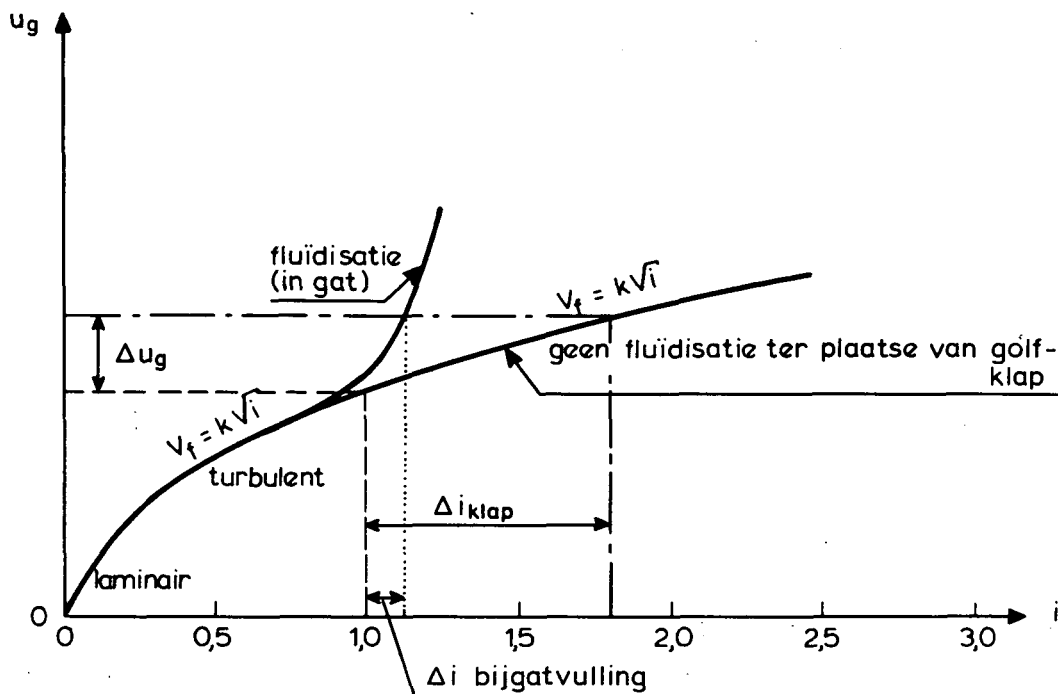
Een filterkorrel die bovenin het filter tussen andere korrels inligt, ondervindt in die positie een grote opwaartse kracht. Dit is een gevolg van het feit dat de stroming zich met moeite tussen de poriën doorwringt, waardoor er een groot drukverval over de korrel staat.

Als een korrel in die situatie verkeert, dan is het denkbaar dat tijdens de korte drukpiek van een golfklap de korrel een hoeveelheid impuls krijgt, die

voldoende is om hem door de toplaag te schieten (zie figuur 33).

De golfklap vindt echter pas plaats bij maximale golfsterugloop en er een aanzienlijke waterstroom door de gaten naar buiten treedt. Deze stroming veroorzaakt fluïdisatie (zie vorige paragraaf).

Dit heeft grote konsekwenties voor het verband tussen de filtersnelheid ($\sim u_g$) en het verhang over de bovenste korrels. Dit is in onderstaande figuur schematisch weergegeven.



De golfklap wordt door het filter doorgegeven aan de gatvulling, zoals weergegeven in figuur 33. Allereerst komt de drukpiek (Δi_{klap}) (golfklap) langs niet gefluïdiseerde korrels, waardoor lokaal de filtersnelheid een beetje toeneemt (Δu_g). Deze weinig verhoogde filtersnelheid is ook aanwezig ter plaatse van de gatvulling. De kleine verhoging van de filtersnelheid geeft echter slechts een (zeer) kleine verhoging van het verhang over de gefluïdiseerde korrels. Dit betekent dat de opwaartse kracht op deze korrels als gevolg van de golfklap nauwelijks toeneemt.

Gekonkludeerd kan worden dat het lanceermechanisme niet zal optreden.

3.2.4 Uitspoeling van individuele korrel

Bij voldoende hoge snelheid in een gat kan een filterkorrel tegen de werking van de zwaartekracht meegevoerd worden door de toplaag. In deze paragraaf wordt getracht de minimale grootte van de stroomsnelheid in het gat te schatten die dit teweeg kan brengen. Aangenomen wordt dat het gat in de stroomrichting prismatisch is en dat traagheidskrachten een ondergeschikte rol spelen. De filterkorrel in het gat ondervindt twee krachten:

- Zwaartekracht:

$$F_g = M_w g \cos\alpha = V\rho \Delta g \cos\alpha \quad (3.12)$$

Δ = relatieve soortelijke massa van filterkorrel (-)

V = volume van korrel (m³)

M_w = korrelgewicht onder water (kg)

F_g = zwaartekracht (N)

- Stromingskracht:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho A C_d u^2 \quad (3.13)$$

F_s = stromingskracht (N)

A = aanstroomoppervlak korrel (m²)

C_d = weerstandscoefficient (-)

u = watersnelheid naast de korrel tov de korrelsnelheid (m/s)

Krachteevenwicht:

$$F_g = F_s$$

$$V \rho \Delta \cos\alpha = \frac{1}{2} \rho A C_d u^2 \quad (3.14)$$

Hierbij is verondersteld dat er geen wrijving is tussen de korrel en de gatwand. Dit is aannemelijk gezien het feit dat de korrel rollend door het gat kan.

Voor de snelheid u van de korrel ten opzichte van de watersnelheid naast de korrel geldt:

$$u = (u_g - u_k) \frac{A_g}{A_g - A} \quad (3.15)$$

u_g = watersnelheid in gat zonder korrel (m/s)

u_k = korrelsnelheid (m/s)

A_g = oppervlak van gatdoorsnede (m²)

Dit ingevuld in formule (3.14) levert na uitwerken:

$$u_k = u_g - (1-A/A_g) \sqrt{\frac{2V \Delta g \cos\alpha}{A C_d}} \quad (3.16)$$

Bij benadering geldt dat een korrel de vorm van een ellipsoïde heeft, waarvoor geldt:

$$V/A = (\frac{1}{6} \pi abc)/(\frac{1}{4} \pi ac) = \frac{2}{3} b = \frac{2}{3} D_f \quad (3.17)$$

a, b en c = respectievelijk de grootste, middelste en kleinste korreldiameter (m)

D_f = karakteristieke korreldiameter

Substitueren in formule (3.16) geeft:

$$u_k = u_g - (1-A/A_g) \sqrt{\frac{4}{3} \Delta g D_f \cos\alpha / C_d} \quad (3.18)$$

De grootte van C_d voor een bol in een buis is door Achenbach [27] empirisch bepaald. Hij vond:

$$\frac{C_d}{C_{d\infty}} = 1 + 1,45 \left(\frac{D_f}{G}\right)^{4,5} \quad (3.19)$$

$$C_{d\infty} = C_d \text{ als } G = \infty$$

Bij gebrek aan andere gegevens wordt hier aangenomen dat deze relatie ook geldt voor een filterkorrel.

In [8] wordt de grootte van $C_{d\infty}$ voor een korrel gegeven: $C_{d\infty} = 1$ als $c/ab = 0,7$ en $Re > 300$. Met $A = \frac{1}{4} \pi D_f^2$ en $A_g = \frac{1}{4} \pi G^2$ wordt formule (3.19):

$$C_d = 1 + 1,45 (A/A_g)^{2,25} \quad (3.20)$$

Dit ingevuld in formule (3.18) levert:

$$u_k = u_g - (1-A/A_g) \sqrt{\frac{4}{3} \Delta g D_f \cos\alpha / (1 + 1,45 (A/A_g)^{2,25})}$$

ofwel:

$$u_k = u_g - 1,14 (1-A/A_g)^{1,2} \sqrt{\Delta g D_f \cos \alpha} \quad (3.21)$$

De voor uitspoeling minimaal benodigde watersnelheid in het gat bedraagt:

$$u_{g,cr} = u_{k \min} + 1,14 (1-A/A_g)^{1,2} \sqrt{\Delta g D_f \cos \alpha} \quad (3.22)$$

$u_{k \min}$ = minimaal benodigde korrelsnelheid om gedurende de overbelaste situatie een afstand Y af te leggen, zodat de korrel uit gat is gelicht (bv.: $u_{k \min} = Y/4T$)

$u_{g \ cr}$ = watersnelheid in gat dat nog net uitspoeling oplevert (m/s)

In figuur 34 en 35 is formule (22) grafisch weergegeven.

Als de optredende watersnelheid in een gat iets kleiner is dan de in figuur 34 gegeven kritische snelheid, dan wordt de korrel meegevoerd in het gat, maar haalt de bovenzijde van de toplaag niet wegens de beperkte duur van de belasting. Opgemerkt moet worden dat deze beweging van filterkorrels in het gat pas optreedt als ook de toplaag bijna bezwijkt. Dit is een gevolg van de ontwerp-eis dat uitspoeling niet mag optreden zolang de toplaag stabiel is. Mocht men eisen dat tot het bezwijken van de toplaag de filterkorrels niet mogen bewegen, dan moet in formule (3.22) $u_{k \min} = 0$ gesteld worden.

Bij de boven beschreven ontwerpregel is geen rekening gehouden met het feit dat de waterstroom langs het talud ook in staat zou kunnen zijn om filterkorrels uit te spoelen. Dit is globaal akseptabel zolang de diameter van het gat klein is ten opzichte van de dikte van de toplaag.

Gekonkludeerd kan worden dat vergroting van de gaten een grotere kritieke stroomsnelheid oplevert. De belasting verandert daarbij nauwelijks ($u_{g \ max}$ is nauwelijks afhankelijk van A_g ; zie figuur 32).

Als $A \sim A_g$ dan is het grensvlak volgens bovenstaande ontwerpregel meestal onvoldoende stabiel. De kans is echter zeer groot dat erosie beperkt blijft tot slechts enkele korrels, omdat de toplaag ongeveer geometrisch dicht is.

Als A en A_g evenredig vergroot worden, blijft de belasting ongeveer konstant en neemt $u_{g \ cr}$ iets toe. Als $A/A_g > 0,7$ dan is deze toename erg klein. Uit figuur 34 volgt dat meerdere kleine gaten eerder tot erosie leidt dan één

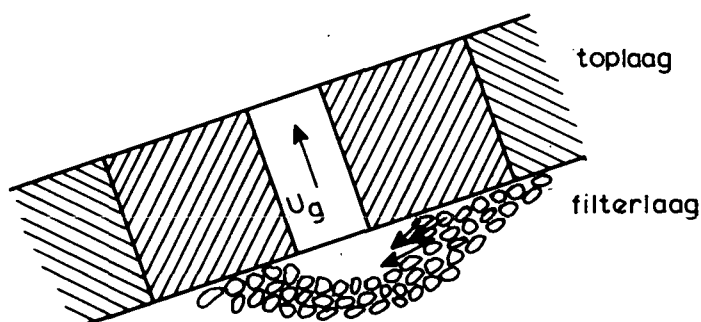
groot gat, aannemende dat ook de kleine gaten groter dan de filterkorrels zijn en de belasting u_g niet verandert.

3.2.5 Erosie-proces van een filter

De ernst van een overbelaste situatie kan beoordeeld worden aan de hand van een studie naar het erosie-proces en de uiteindelijke evenwichtssituatie. Het erosie-proces van het filter bij uitspoeling van filterkorrels door de toplaag is nog niet eerder in een model onderzocht. Exakte gegevens ontbreken daardoor. Desondanks is er toch een globale kwalitatieve beschrijving mogelijk van het te verwachten erosieproces.

De voorwaarden voor erosie zijn uiteraard een gat in de toplaag dat groter is dan de filterkorrels en een voldoende grote belasting.

De korrels direct onder het gat zullen dan fluïdiseren (zie par. 3.2.2) en uitspoelen (zie par. 3.2.4). Het gevolg is een erosiekuil met een verhang in de kuilbodem dat ongetwijfeld nog steeds groter is dan 1. Door fluïdisatie wil er een horizontale kuilbodem instellen hetgeen betekent dat de filterkorrels naar het lagere deel (recht onder het gat) van de kuil zullen vloeien.



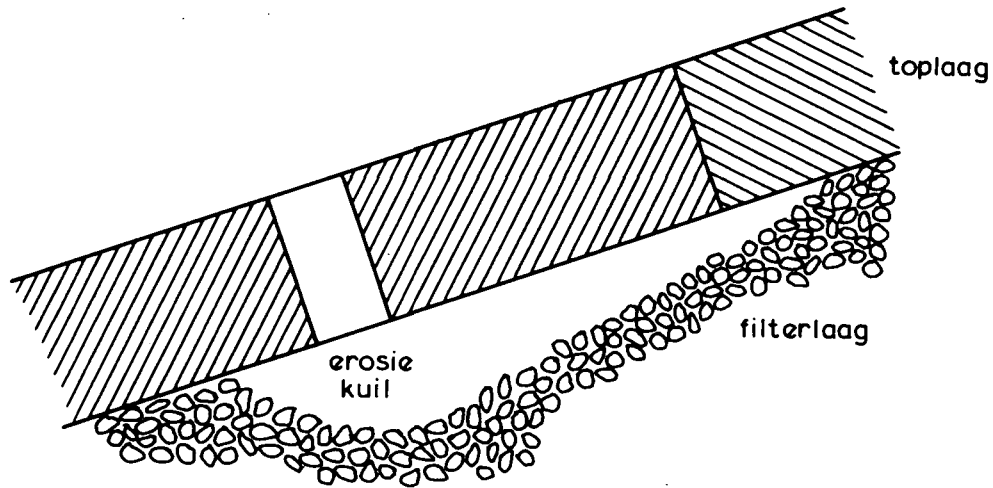
Deze korrels komen onder invloed van het gat en spoelen uit.

Door het grote verhang in de kuilbodem mag verwacht worden dat de korrels op gaan springen zoals ook in [28] is gekonstateerd (korrel lag los op een filter dat met een gaas op z'n plaats werd gehouden; bij $i \sim 2$ bleek de korrel te gaan springen). Dit springgedrag zorgt ervoor dat ook de korrels die wat dieper in de kuil liggen steeds onder invloed van het gat blijven en kunnen uitspoelen.

Een gevolg van de fluïdisatie van het filter is een uitbreiding van de erosiekuil in de richting langs het talud omhoog. Dit erosie-proces is te vergelijken met het begin van piping.

Het proces stopt op het moment dat het oppervlak van de kuil zo groot is ge-

worden dat het verhang in de kuilbodem niet meer in staat is om voor erosie van de hellende kuilbodem te zorgen:



Tijdens het erosie-proces neemt de belasting geleidelijk toe, omdat de aanstroomweerstand verdwijnt. De doorlatendheid van het gat neemt daardoor toe, met als gevolg dat de stroomsnelheid in het gat ook toeneemt (zie par. 3.2.1). Het proces kan plotseling stoppen als een grote korrel het gat blokkeert. Bij sterk gegradeerd materiaal is te verwachten dat de grootte van de kuil hoofdzakelijk door de kans op zo'n blokkering wordt bepaald.

Kwantitatieve uitspraken over kuilvorm en -diepte zijn in dit stadium van het onderzoek nog niet te geven. Deze zijn echter wel nodig om te kunnen beoordelen of de gestelde ontwerpeis (geen erosie voordat toplaag bezwijkt) te streng is.

Meer gegevens over het erosie-proces zijn dus gewenst en die zijn te verkrijgen door middel van modelonderzoek (zie Appendix II).

Filter met niet uniforme korrelgrootte

In de voorgaande paragraaf zijn regels afgeleid waarmee de belasting bij het begin van uitspoelen van individuele korrels kan worden berekend. Een filter met uniforme korrelgrootte zou hiermee gedimensioneerd kunnen worden. Een reëel filter bestaat echter uit een verzameling korrels van ongelijke grootte. De situatie kan zich daarom voordoen dat slechts een deel van de korrels uitspoelt omdat de andere (meestal grotere) korrels pas uitspoelen bij een grotere belasting. Korrels die groter zijn dan het gat kunnen nooit uitspoelen en zouden het gat zelfs kunnen blokkeren, zodat ook andere korrels niet meer uitspoelen.

Voor het geval dat alle korrels kleiner dan het gat zijn kan in figuur 35 afgelezen worden welke korrels uitspoelen bij een bepaalde belasting. Deze figuur is getekend op basis van formule (3.22). Bij een belasting $u_g = 0,7$ m/s bijvoorbeeld zijn alleen de korrels met korrelgrootte tussen 9 en 24 mm in staat in het filter te blijven, omdat voor deze korrels geldt dat $u_g < u_{gcr}$. Voor de andere korrels geldt dat $u_g > u_{gcr}$ en spoelen dus uit. Het uitspoelen blijft beperkt tot de directe omgeving van het gat, tenzij het filter niet intern stabiel is of de stabiele korrels maar een klein deel van het totaal uitmaken. Een filter met korrels van 5-25 mm zou daarom in het bovenstaande geval voldoende bestand kunnen zijn tegen uitspoelen.

Als er in het filter korrels voorkomen die groter zijn dan het gat, dan zijn er twee situaties denkbaar: a) Er is een grote korrel bij het gat die voor blokkering kan zorgen. b) Er is toevallig geen grote korrel in het filter in de buurt van het gat.

Voor de eerste situatie geldt dat een te grote korrel alleen voor een tijdelijke verstopping kan zorgen. Deze blokkering is maar tijdelijk omdat even later het water, dat het talud instroomt tijdens golfoploop, de steen weer van het gat wegdrukt. Het is niet zeker of de korrel tijdens de golfsterugloop het gat zo snel weer kan verstoppen dat er geen andere korrels de gelegenheid krijgen uit te spoelen. Dit zou als konsekwentie kunnen hebben dat, zelfs met een te grote korrel in de buurt van het gat, er op den duur een kuil gevormd kan worden. Modelonderzoek moet hierover meer informatie verschaffen (zie Appendix II).

De tweede situatie (geen korrel bij het gat) kan zich voordoen als slechts een klein percentage van de korrels groter dan het gat is. De kans dat er geen korrel in de buurt van het gat zit, kan als volgt benadert worden. Stel x gewichtsprocent van de filterkorrels is groter dan het gat: $D_x = G$. In 100 kg filtermateriaal zit dus x kg te grote korrels. Als $x \ll 100$ dan kan aangenomen worden dat deze grote korrels omgeven worden door kleine korrels en hoeft er geen poriënvolume aan de grote korrels toegerekend te worden:

$$V_g = x/\rho_s \quad (3.23)$$

V_g = volume (excl. poriën) van korrels die groter dan het gat zijn (m^3)

Het volume kleine korrels bedraagt:

$$V_k = \frac{100 - x}{(1 - n)\rho_s} \quad (3.24)$$

V_k = volume (incl. poriën) van korrels die kleiner dan het gat zijn (m^3)

Het totale volume is:

$$V = V_k + V_g = \frac{100 - x}{(1 - n)\rho_s} + \frac{x}{\rho_s} = \frac{100 - nx}{(1 - n)\rho_s} \quad (3.25)$$

Het volume-percentages te grote korrels bedraagt derhalve:

$$y = 100 \frac{V_g}{V} = \frac{100 \cdot x \cdot (1 - n)}{100 - n \cdot x} \quad (3.26)$$

We delen nu de ruimte onder een gat op in bolvormige volume-eenheden met diameter G (1 V.E. $\sim \frac{1}{6} \pi G^3$). De kans, dat het zwaartepunt van een te grote korrel in een bepaalde volume-eenheid zit, is ongeveer y . De kans, dat in a volume-eenheden alle korrels kleiner dan G zijn, is:

$$\begin{aligned} P_a(D_f < G) &= \left(1 - \frac{V_g}{V}\right)^a = \left(1 - \frac{y}{100}\right)^a \\ &= \left(1 - \frac{x(1 - n)}{100 - nx}\right)^a \end{aligned} \quad (3.27)$$

Met $n = 0,4$ wordt dit:

$$P_a(D_f < G) = \left(1 - \frac{0,6x}{100 - 0,4x}\right)^a \quad (x \ll 100) \quad (3.28)$$

Deze formule is grafisch weergegeven in figuur 36. Opvallend is dat zelfs als $D_{f70} = G$ (zodat $x = 70\%$) er nog vrij grote erosie-kuilen kunnen ontstaan zonder dat er blokkering kan optreden. Onder 1 op 300 gaten kan dan een kuil van 25 V.E. ontstaan, want in de figuur is te zien dat $P_a = 0,3\%$.

Gekonkludeerd kan worden dat pas van een tijdige verstopping van de gaten sprake kan zijn als $D_{f50} > G$.

Als voorbeeld wordt een toplaag met gaten van 40 mm genomen. De belasting bedraagt $u_g = 0,7$ m/s. Het filter kan op twee manieren gedimensioneerd worden:

a) Zorg dat voor 70% van het filter geldt dat $u_{gcr} > u_g$.

Met figuur 34 is eenvoudig in te zien dat een filter met korrels tussen 5 mm en 25 mm voldoende stabiel is

b) Zorg voor tijdige blokkering: $D_{f50} > G$.

Er is een filter nodig met $D_{f50} = 40$ mm.

In veel gevallen zal filter b te grofkorrelig zijn om een steenzetting op aan te brengen en kiest men voor filter a.

3.2.6 Vergelijking met metingen

De in de vorige paragrafen afgeleide formules zijn getoetst aan de hand van de in het verleden uitgevoerde modelonderzoeken in de Deltagoot.

Allereerst wordt het in [32] beschreven onderzoek naar de stabiliteit van Basalton geanalyseerd. In het verslag is geen melding gemaakt van uitspoeling van het filtermateriaal, waaruit in dit verband is gekonkludeerd dat er geen noemenswaardige uitspoeling heeft plaatsgevonden.

In een Basalton-talud komen gaten voor van diverse grootte. Veel voorkomend zijn driehoekige gaten van orde 50 mm. Gekonkludeerd kan worden dat het filtermateriaal, bestaande uit Silex met korrelgrootte 20 mm tot 90 mm ($D_{f15} = 25$ mm, $D_{f50} = 80$ mm), niet door deze gaten kan uitspoelen vanwege geometrische beperkingen. Slechts sporadisch zijn er vierkante gaten van 80 x 80 mm. Met figuur 36 ($x = 50$) blijkt dat er slechts 1% kans is dat 10 volume eenheden hierdoor uit kunnen spoelen, hetgeen in het onderhavige geval overeenkomt met 500 cm³ silex. Deze kans is te klein om enige uitspoeling van betekenis in de Deltagoot waar te nemen.

In het Oesterdamonderzoek [34] zijn enkele proeven uitgevoerd met blokken (25 x 15 cm en 10 cm dik) met een gat (doorsnede 60 mm) en met vellingkanten die

een gaten van 70 x 70 mm vormden. De korrelgrootte van het filtermateriaal is niet gegeven. Een schatting aan de hand van de beschikbare foto's levert:

$$20 < D_f < 40 \text{ mm en } D_{f15} \sim 25 \text{ mm.}$$

Gebruik makend van formule (3.22) en (3.7) kan de snelheid in het gat bij beginnende uitspoeling en de optredende snelheid bij bezwijken van de zetting berekend worden:

$$\begin{aligned} u_{kmin} &= 0,1 \text{ m/s (schatting)} \\ A &= 7 \text{ cm}^2 \quad (\text{aanstroomoppervlak bij } D_f = 30 \text{ mm}) \\ A_g &= 28 \text{ cm}^2 \quad (\text{doorsnede 60 mm}) \\ \Delta &= 1,6 \\ D_f &= 30 \text{ mm} \\ \cos(\alpha) &= 0,97 \\ & \Rightarrow u_{gcr} = 0,65 \text{ m/s (sterkte)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda k' &= 0,3 \text{ m/s} \\ r_s &= 1,1 \quad (\text{blokken op pennenrooster}) \\ \Delta_s &= 1,4 \\ \cos(\alpha) &= 0,97 \\ & \Rightarrow u_{max} = 0,3 \text{ m/s (belasting)} \end{aligned}$$

Dit laatste resultaat is in overeenstemming met de meting tijdens het doorlatendheidsonderzoek [30].

Volgens de berekening blijkt er nog lang geen uitspoeling te moeten plaatsvinden, terwijl dit tijdens de Deltagoot proeven wel gebeurde. Het verschil tussen berekening en meting wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat de gaten erg groot zijn ten opzichte van de blokdikte ($G/D = 0,6$). Hierdoor is het uittredende debiet niet meer de enige bedreiging van het filter, maar is ook de stroming in het gat als gevolg van het over het talud stromende water van belang. Dit wordt bevestigd door de metingen in de Filterbak, die uitgevoerd zijn met uitsluitend een uittredend debiet en filterkorrels van 8-25 mm (zie [30], proef T2). Zelfs bij een verhang ter grootte 2 over de toplaag was er geen sprake van uitspoeling, (met belasting en sterkte vergelijkbaar met de situatie in de Deltagoot). Het verschil tussen Deltagoot en Filterbak, met name het over het talud stromende water, wordt daarom voor de uitspoeling verantwoordelijk gehouden.

Andere onderzoeken in de Deltagoot, zoals [31] en [33], blijken niet geschikt te zijn voor deze verifikatie, omdat de toplaag geometrisch dicht was voor het filtermateriaal. Ook in de buitenlandse literatuur is niets op dit gebied gevonden.

Gekonkludeerd kan worden dat er nauwelijks geschikt materiaal voor handen is om de afgeleide formules te verifiëren.

3.2.7 Konklusies ten aanzien van kleine gaten

Met een afschatting van het optredende verhang onderin een gat is aangetoond dat er sprake is van lokale fluidisatie. Hierdoor lijkt het niet aannemelijk dat een golfklap bijdraagt aan de uitspoeling. Uitspoeling dreigt slechts ten tijde van golfterugloop als het uittredende debiet korrels kan meevoeren door het gat.

Op basis van een empirische formule voor de kracht op een bol in een buis met cirkelvormige doorsnede is een formule afgeleid waarmee de kritieke snelheid in het gat berekend kan worden voor het geval dat uitspoeling door een uittredend debiet maatgevend is. Getracht is deze formule te toetsen met het onderzoek dat in de literatuur is te vinden. Helaas was hiervoor te weinig geschikt materiaal aanwezig.

Uit het Oesterdamonderzoek [34] is gekonkludeerd dat bij een gat, dat orde twee maal dieper is dan breed, niet uitsluitend het uittredende debiet van belang is, maar ook de waterbeweging als gevolg van het over het talud stromende water.

3.3 Dijkbekledingen met grote gaten

3.3.1 Inleiding

Bij de nadere analyse van het Oesterdamonderzoek [34] is in de vorige paragraaf geconstateerd dat bij een bepaalde verhouding van gatbreedte en -diepte (G/D orde 2 à 3) ook de stroming over het talud van belang wordt. Er is dan sprake van één of meer neren in het gat, die samen met het uit het talud stromende water erosie kunnen veroorzaken. Bij zeer grote gaten (G/D orde 1) zal het uitstromende water zelfs verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de invloed van de neer in het gat.

In het onderzoek worden enkele stappen onderscheiden, die overeenkomen met de aspecten die van belang lijken te zijn. In figuur 14 is dit schematisch weergegeven. In het bovenste hokje is de gegeven randvoorwaarde vermeld: de golfrandvoorwaarde bij het talud en de geometrie. Vervolgens is een overdrachtsfunctie nodig om hiermee de snelheid op het talud te bepalen. Daarvan afhankelijk is de snelheid in de neer in het gat, terwijl hier tevens de invloed van het uittredende debiet van invloed zal zijn. In het onderste hokje is de vraag gesteld of de snelheid in het gat in staat is de filterkorrels weg te voeren.

Naast deze fundamentele lijn in het onderzoek is er aandacht voor een "black-box"-benadering die slechts voor konkrete gevallen het verband legt tussen de golfrandvoorwaarden en de geometrie en of er erosie zal optreden. Ook dit is in figuur 14 aangegeven. De black-box is slechts gebaseerd op metingen.

In onderstaande paragrafen wordt dezelfde onderverdeling aangehouden als in figuur 14.

3.3.2 Waterbeweging op het talud

De waterbeweging op een talud, belast door brekende golven, is uitvoerig onderzocht door Battjes en Roos [24]. Zij hebben de waterdiepte op enkele plaatsen op het talud tijdens golfoploop en -neerloop gemeten en daaruit afgeleid wat het (tijdafhankelijke) debiet in de meetraaien is geweest. Na deling door de momentane waterdiepte is de gemiddelde watersnelheid verkregen. Het modelonderzoek is uitgevoerd op kleine schaal met gladde taluds van 1:3, 1:5 en 1:7. De golfsteilheid is gevarieerd van 2% tot 7%.

De hoogste snelheden blijken meestal op of iets boven SWL op te treden. Hoewel in veel literatuur u/\sqrt{gH} wordt gegeven, wordt in [24] de voorkeur uitgesproken voor $u/(gT)$:

Golfoploop:

| | | |
|------------------|---------------------------------|--------|
| talud 1:3 | $u/(gT) = 0,08 \text{ à } 0,10$ | (3.29) |
| talud 1:5 of 1:7 | $u/(gT) = 0,05 \text{ à } 0,06$ | |

Golfneerloop:

| | | |
|-----------|---------------------------------|--------|
| talud 1:3 | $u/(gT) = 0,10 \text{ à } 0,12$ | (3.30) |
| talud 1:5 | $u/(gT) = 0,06 \text{ à } 0,07$ | |
| talud 1:7 | $u/(gT) = 0,04$ | |

met:

| | | |
|-----|-------------------------------------|---------------------|
| u | = grootste snelheid langs het talud | (m/s) |
| g | = zwaartekrachtsversnelling | (m/s ²) |
| T | = golfperiode | (s) |
| H | = golfhoogte bij teen van talud | (m) |

Voor de waterlaagdikte op het talud is het volgende gemeten:

$$h/\sqrt{(HL_0)} = 0,08 \text{ bij SWL}$$
$$h/\sqrt{(HL_0)} = 0,05 \text{ bij } x = 0,29\sqrt{(HL_0)}$$

met:

| | | |
|-------|--|-----|
| h | = waterlaagdikte op het talud | (m) |
| L_0 | = golflengte op diep water = $gT^2/(2\pi)$ | (m) |
| x | = afstand langs het talud omhoog vanaf SWL | (m) |

Aangenomen wordt dat bovenstaande empirische relaties zijn te gebruiken om de snelheid vlak boven de toplaag te berekenen. Vanwege het feit dat er geen gelegenheid is voor de ontwikkeling van een grenslaag is het aannemelijk dat de lokale snelheid vlak boven de toplaag niet beïnvloed wordt door de ruwheid van het talud.

3.3.3 Snelheid in een gat en erosie

In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de kennis omtrent de snelheid in een gat als functie van de gatgeometrie en de snelheid vlak boven het talud. Het blijkt dat in een gat met gelijke breedte als diepte een neer draait met een snelheid van orde 25% van de snelheid op de toplaag. In diepere gaten ontstaan twee of meer neren boven elkaar, waarbij een onderliggende neer langzamer draait dan de neer erboven.

Verwacht mag worden dat de invloed van het uittrekkende debiet bij dijken veel belangrijker is dan bij oevers, omdat de korrelgrootte van het onder de toplaag gebruikte filter veel grover is dan het zand of de teelaarde die bij oevers gebruikelijk is. Over deze invloed is helaas geen literatuur beschikbaar.

Uitspoeling van filtermateriaal zal optreden als aan de volgende twee voorwaarden is voldaan:

1. De opwaarts gerichte stroming in het gat moet minstens gelijk zijn aan u_{gcr} volgens formule (3.22). Praktisch geproken betekent dit dat de stroming de valsnelheid van de korrels moet overtreffen.
2. De schuifspanning op de korrels op de bodem moet in staat zijn de korrels in beweging te brengen.

Op vergelijkbare wijze als in paragraaf 3.2.2 is aan te tonen dat het uittredende debiet al voldoende is om aan voorwaarde 2 te voldoen. Erosie zal dus plaatsvinden als het uittredende debiet, samen met de snelheid in de neer, een opwaartse snelheid oplevert die groter is dan de valsnelheid van de korrels [35] (mits $D_f \gg G$, anders formule (3.22) gebruiken):

$$u_{gcr} = 1,1 \sqrt{(\Delta g D_f)} \quad (3.33)$$

met:

- u_{gcr} = kritieke opwaartse snelheid in het gat ten aanzien van uitspoeling van korrels (m/s)
 Δ = relatieve soortelijke masse van korrel (-)
 D_f = karakteristieke korrelgrootte van filter (m)

Met het bovenstaande kan getracht worden om het resultaat van het Oesterdam-onderzoek [34] te verklaren:

Golfperiode: $T = 2,5$ à $2,7$ sec.

Talud 1:4

Snelheid op talud bij golfoploop (formule 3.29): $u = 1,5$ à 2 m/s

Snelheid op talud bij golfneerloop (formule 3.30): $u = 2$ à $2,5$ m/s

Snelheid in bovenste neer ($u_w = u/4$) = $0,4$ à $0,7$ m/s.

In paragraaf 3.2.7 is berekend dat het uittredende debiet ongeveer $0,3$ m/s is, en dat $u_{gcr} = 0,65$ m/s. Gezien het feit dat de snelheid in de bovenste neer van dezelfde orde van grootte is als u_{gcr} en er sprake is van een niet te verwaarlozen uittredend debiet, is met de formules verklaarbaar dat er uitspoeling optreedt.

In [31] zijn de resultaten van het stabiliteitsonderzoek van Armorflex beschreven. De laatste proeven zijn uitgevoerd met een gatvulling, bestaande uit een mengsel van kif en betongrind. De lage doorlatendheid van dit

vulmateriaal ($D_{15} = 1,8 \text{ mm}$; $D_{50} = 10 \text{ mm}$; $k = 25 \text{ mm/s}$) heeft als gevolg dat de top laagdoorlatendheid gedomineerd wordt door het verval over de gatvulling. Bij een percentage open ruimte van 20% wordt daardoor de top laagdoorlatendheid $k' = k/5 = 5 \text{ mm/s}$. Bij potentiële instabiliteit is door deze lage k' het debiet door de gaten maar klein, namelijk orde 0,03 m/s.

De gatgrootte in de stroomrichting bedraagt $G = 0,065 \text{ m}$. Op basis van de resultaten van paragraaf 2.3.2 kan een maximale erosie-diepte Y verwacht worden ter grootte: $Y = G = 6,5 \text{ cm}$.

Na regelmatige golven ($H = 0,61 \text{ m}$ en $T = 6 \text{ s}$) is de uitspoeling boven de stilwaterlijn gemeten: $Y = 3,5 \text{ cm}$. Na onregelmatige golven ($H_s = 1,22 \text{ m}$ en $T_p = 3,73 \text{ s}$ gedurende 40 min.) bleek vlak boven SWL de erosie nog iets verder te zijn gegaan: $Y = 7 \text{ à } 9 \text{ cm}$.

Gekonkludeerd kan worden dat de erosie groter is dan op basis van paragraaf 2.3.2 is te verwachten: $Y/G = 1,5$. Wellicht is dit veroorzaakt door de erg hoge snelheid die op een door golven belast talud optreedt. Met formule (3.30) blijkt deze snelheid orde 4 à 6 m/s te bedragen. In de bovenste neer in het gat is de snelheid dan groter dan de valsnelheid:

$$\begin{aligned} u_w &= 0,25 u = 1 \text{ à } 1,5 \text{ m/s} \\ w &= \text{valsnelheid van korrels (m/s)} \\ &= 1,1 \sqrt{(\Delta g D_f)} \\ &= 1,1 \sqrt{(1,6 * 9,8 * 0,01)} = 0,4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

De kennis op het gebied van stroming in een gat, als functie van een debiet door en over het gat, is helaas onvoldoende om een gedetailleerde uitspraak over de te verwachten erosie te doen. De kennis uit paragraaf 2 is alleen toepasbaar als de stroming door de top laag verwaarloosbaar is. Dit is het geval bij een groot percentage open ruimte in de top laag. Wel moet men rekenen op een grotere erosie-diepte als de snelheid in de bovenste neer groter is dan de valsnelheid van de korrels, in [31] is gebleken dat $Y/G = 1,5$.

Het direkte verband tussen de watersnelheid op het talud en de erosie is langs empirische weg vastgesteld door Brown [19]. Hoewel zijn werk zich beperkt tot zand als gatvulling ($0,32 < D_{50} < 1,55 \text{ mm}$), wordt zijn empirische formule, bij gebrek aan beter, hier toch genoemd (zie figuur 29):

$$u = 21 D_{50}^{0,43} (Y/G)^{0,45}$$

| | | |
|-----------------|--|-------|
| met: u | = snelheid op het talud | (m/s) |
| D ₅₀ | = korrelgrootte die door 50 gewichtsprocenten van het filter worden onderscheiden | (m) |
| Y | = gatdiepte bij evenwicht | (m) |
| G | = gatdiameter | (m) |

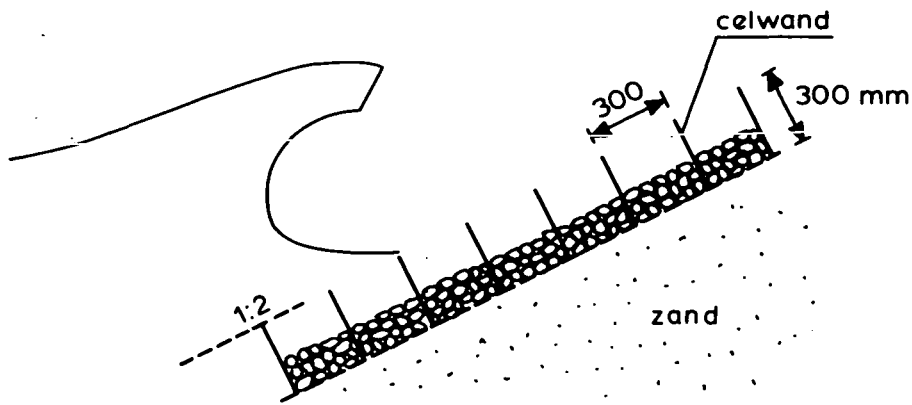
Deze formule is opgesteld aan de hand van modelproeven met zowel filters met steile als met flauwe zeefkromme. De grootte van Y/G is gevarieerd van 0,8 tot 2,4.

3.3.4 Black-box model op basis van metingen

Op basis van het gemeten verband tussen de kritieke golfhoogte en -periode ten aanzien van uitspoeling en de gebruikte geometrie is het mogelijk een black-box model op te zetten. Een onmiskenbaar voordeel van deze methode is dat direkt het gewenste verband tussen randvoorwaarden en ongewenste gebeurtenis wordt gelegd. Een belangrijk nadeel is dat de gevonden relaties slechts gelden voor de onderzochte situaties, waardoor het black-box model pas toepasbaar zal zijn als er veel meetgegevens verzameld zijn.

Markle beschijft in [23] de resultaten van zijn drie-dimensionale modelproeven in een 15 m brede golfgoet. De proeven zijn uitgevoerd bij een schaal 4, waarbij de schaalregel van Froude is gebruikt. De waterdiepte in het model was steeds 1,35 m. In de goet zijn drie taluds schuin achter elkaar geplaatst, ieder met een taludhelling van 1:2, belast door regelmatige golven. De voorste was loodrecht op het golfschot gericht (hoek van golfival = $\omega = 90^\circ$), die daar schuin achter was 30° gedraaid ($\omega = 60^\circ$) en de achterste nog eens 30° ($\omega = 30^\circ$). De taluds waren als volgt verdedigd met stortsteen van 50 tot 100 mm (0,27 tot 2,02 kg; $D_{f50} = 75$ mm):

- proef 1: Kubische cellen van $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ m³ geheel gevuld met stortsteen
- proef 2: Kubische cellen van $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ m³ half gevuld met stortsteen
- proef 3: Cellen van $1,2 \times 0,6 \times 0,45$ m³ (LxBxD) geheel gevuld met stortsteen
- proef 4: Cellen van $1,2 \times 0,6 \times 0,45$ m³ (LxBxD) half gevuld met stortsteen



VERTICALE DOORSNEDE TALUD (PROEF 2)

Onder de verdediging lag zand. Als ontwerpeis is gehanteerd dat dit zand niet bloot mag komen te liggen.

Het talud is steeds hersteld na een bepaalde golfperiode gebruikt te hebben.

Bij proef 1 waren de golfkondities als volgt:

$T = 2$ s met $0,3 < H < 0,53$ m

$T = 4$ s met $0,3 < H < 0,9$ m

$T = 6$ s met $0,3 < H < 0,75$ m

Na de proef is enig materiaalverlies rond SWL geconstateerd. Nergens kwam de basis bloot te liggen. Grotere golfhoogte of -periode bleek meer beweging op te leveren. Bij $\omega = 30^\circ$ was de beweging wat minder dan bij $\omega = 60^\circ$ of 90° , die beide een gelijke beweging te zien gaven. De erosie varieerde van 25% tot 67% van het celvolume.

Bij proef 2 waren de golfkondities als volgt:

$T = 2$ s met $H = 0,53$ m

$T = 4$ s met $H = 0,9$ m

$T = 6$ s met $H = 0,75$ m

Ook bij deze proef bleef de basis nog bedekt met stortsteen, hoewel bij sommige cellen er niet veel over was. Het materiaal blijkt zodanig te verplaatsen dat er een horizontale bodem in een cel ontstaat.

Bij proef 3 waren de golfkondities als volgt:

$T = 2$ s met $0,3 < H < 0,6$ m

$T = 6$ s met $0,3 < H < 0,9$ m

De basis kwam bloot te liggen bij een golfhoogte van 0,45 m. De invloed van ω was bij $T = 2$ s gelijk aan die bij proef 1, maar bij $T = 6$ s was er geen verschil in de mate van beweging voor $\omega = 30, 60$ of 90° .

Bij proef 4 waren de golfkondities als volgt:

$T = 6 \text{ s}$ met $0,3 < H < 0,9 \text{ m}$

Bij een golf van 0,6 m hoog werd de basis zichtbaar. Opmerkelijk is dat de schade bij $\omega = 60^\circ$ groter was dan bij $\omega = 90^\circ$. Bij $\omega = 30^\circ$ is de schade het kleinste.

Op basis van de resultaten van het onderzoek beveelt Markle het volgende aan:

Celdiepte-gatgrootte verhouding: $D/G > 1,33 \tan(\alpha)$

Minimum celdiepte: $D > 25 \text{ à } 30 \text{ mm}$

Damsgaard [37] heeft in een smal gootje de stroming tijdens de golfterugloop op het uittredende debiet nagebootst. De toplaag bestond uit SVEE-blokken (zie figuur 6) op een talud van 1:1,5. De gebruikte schaalfactor was 4, hetgeen onoverkomelijke schaalearselen met zich meebracht.

Bij een snelheid over de blokken van 9,8 m/s en een groot opwaarts verhang is vastgesteld dat het filter met $D_{f50} = 150 \text{ mm}$ onder een gat van 12,5 x 50 cm niet stabiel was. Werd een filter met $D_{f50} = 300 \text{ mm}$ toegepast, dan trad geen erosie van betekenis op.

Tot slot kan het Armorflex-onderzoek genoemd worden [31]. Er bleek een relatieve erosiediepte ter grootte van $Y/G = 1,5$ te ontstaan bij een golfhoogte $H_s = 1,2 \text{ m}$ en een gatvulling met $D_{50} = 10 \text{ mm}$ (zie ook paragraaf 3.3.3).

Gekonkludeerd moet worden dat er thans nog onvoldoende meetresultaten beschikbaar zijn om een bruikbaar black-box model op te zetten.

3.3.5 Konklusies ten aanzien van grote gaten

Aan de hand van de beschikbare literatuur is het mogelijk gebleken een goede benadering van de optredende snelheid op het talud tijdens golfoploop en -neerloop te geven (Battjes en Roos [24]; formule (3.29) en (3.30)). Met behulp van de konklusie uit paragraaf 2 kan de snelheid in de neer in het gat, zonder uittredend debiet, geschat worden. Deze is orde 25% van de snelheid op het talud. Het is echter gebleken dat hiermee nog geen betrouwbare voorspelling van de erosie-diepte kan worden gegeven. Een direkte relatie tussen snelheid op het talud en erosiediepte is gegeven door Brown [19]. De betrouwbaarheid van zijn formule moet echter nog geverifieerd worden voor filtermateriaal met $D_f > 2 \text{ mm}$.

Als het percentage open ruimte in de toplaag klein is, is er sprake van een belangrijk uit het talud stromend debiet. De stroming in het gat is dan onbekend en als gevolg daarvan is tevens de uitspoeling nog onvoorspelbaar.

Ten aanzien van het beoogde black-box model moet gekonkludeerd worden dat er onvoldoende meetresultaten beschikbaar zijn om een bruikbaar rekenmodel op te zetten.

Tijdens het literatuuronderzoek is vooral het werk van Markle [23] zeer relevant gebleken. Hij heeft onderzoek gedaan naar erosie in cellen en konkludeert dat de bodem van een cel onder invloed van golfaanval maar weinig erodeert, het wordt slechts horizontaal. Op basis daarvan beveelt hij het volgende aan:

Celdiepte-gatgrootte verhouding: $D/G > 1,33 \tan(\alpha)$

Minimum celdiepte: $D > 25 \text{ à } 30 \text{ mm}$

Daarentegen kan op basis van [31] gekonkludeerd worden dat de relatieve erosie-diepte $Y/G = 1,5$ kan worden.

Tenslotte wordt verwezen naar Appendix II, waar aanbevelingen worden gedaan voor nader onderzoek.

LITERATUUR

1. Führböter, A.; Macke, E.
Modellversuche für die Sohlsicherung des Eider-Sperrwerkes.
Leichtweiss Institut für Wasserbau der Technischen Universität
Braunschweig, Bericht nr. 440, 1979
2. Parsons, D.A.; Apmann, R.P.
Cellular concrete block revetment
Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 91, WW2, May
1965
3. Rockwell, D.; Knisely, C.
Unsteady features of flow past a cavity
Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 105, HY8, August 1979
4. Ethembabaoglu, S.
Some characteristics of unstable flow past slots
Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, HY5, May 1978
5. Page, R.
Erosion control using seabees.
N.S.W. Institute of Technology, Undergraduate thesis, 1983
6. Rodi
Turbulence models and their application in hydraulics; a state
of art review.
Institute für Hydrmechanik und Sonderforschungsbereich 80
Universität Karlsruhe 1980.
7. Booij, R.
Metingen van uitwisselingen tussen rivier en haven
Technische Universiteit Delft, Afdeling Civiele Techniek, Rapport 9-86,
Delft, 1986
8. Wal, M. van der, Knaap, F.C.M. van der, Verheij H.J.
Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, Erosie en stabiliteit van
bodem en oevers
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1115 deel VIII, Delft, 1982

LITERATUUR (vervolg)

9. Morris, H.M.
Design methods for flow in rough conduits,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 85, no HY 7, 1959
10. Waterloopkundig Laboratorium.
Taludbekleding van gezette steen. Ontwerpregels voor granulaire filters.
Verslag modelonderzoek, M1795/H195 deel XVIII.
Delft, 1986 (concept).
11. Knaap, F.C.M. van der, Klein Breteler, M. en Groot, M.T. de
Taludbekleding van gezette steen. Belasting en sterkte van
zetsteenverdedigingsconstructies op oevers en dijken.
Verslag modelonderzoek, M1115 deel XIV.
Delft, 1985
12. Knight, D.W., MacDonald, J.A.
Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 105, HY6, June 1979.
13. Adachi, S.
On the artificial strip roughness,
Disaster prevention research institute, Kyoto University Bulletin 60,
March 1964.
14. Sayre, W and Albertson, M.L.
The effect of roughness spacing in rigid open channels,
Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins,
Colorado, CER 59 WWS 31, October 1959.
15. Ryabov, A.K.
Hydraulic design of channels with artificial roughness,
Hydrotechnical Construction, No. 9, September 1967.
16. Akan, A.O. en Akiltopu, S.
Open-channel flow resistance with high relative roughness
Proc. XX IAHR Congress, Volume V, Moscow, 1983

LITERATUUR (vervolg)

17. Buffoni, E.
Scabrezza artificiale realizzata con listelli trasversali,
L'Energia elettrica, no. 4, 1986

18. Wal, M. van der
Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen,
Retourstroom, waterbeweging en stabiliteit.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1115 deel Xb, Delft, 1986

19. Brown, C.T.
Flexible revetments, theory and practice
International Conference on Flexible armoured revetments incorporating
geotextiles.
London 1984.

20. Waterloopkundig Laboratorium
Hydraulische ruwheid van een Armorflex-blokkenmat
Bijlage D van "Erosie door open taludbekledingen"
Speurverslag Q439/H657 bijlage D, Delft, 1988

21. Coastal Engineering, Volume II, Harbour and Beach Problems.
Delft University of Technology, Coastal Engineering Group, Department of
Civil Engineering.
Delft, 1978

22. Derks, H.
Zanddichtheid en stabiliteit van Gobi-matten.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R460 deel IX, 1972.

23. Markle, D.G.
Wave stability study of riprap filled cells.
US Army Engineer Waterways Experiment
Station, Vicksburg, 1983.

LITERATUUR (vervolg)

24. Battjes, J.A. and Roos, A.
Characteristics of flow in run-up of periodic waves.
Communications on Hydraulics, 75-3
Department of Civil Engineering
Delft University of Technology.

25. Klein Breteler, M.
Taludbekleding van gezette steen.
Stabiliteit van toplaag zonder inklemming of interlocking.
Waterloopkundig Laboratorium, Concept verslag H195.04, Juni 1987.

26. Klein Breteler, M.
Taludbekleding van gezette steen.
Doorlatendheid van de toplaag.
Waterloopkundig Laboratorium, concept verslag M1881/H195.07, dec. '86

27. Achenbach, E.
The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres.
J. Fluid Mech. (1974), Vol. 65, part 1, pp. 113-125.

28. Maat, S.
Bezwijkgedrag individuele steen in filterpakket.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1860, Jan. 1985.

29. Laboyrie, J.H. en Verhey, H.J.
Aantasting dwarsprofielen in vaarwegen; Technische aanbevelingen voor oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1115 deel XIX, Jan. 1988.

30. Bezuijen, A.
Vergelijking doorlatendheidsonderzoeken en consequenties voor schaalregels.
Laboratorium voor Grondmechanica, verslag WL M1881 deel VII,
LGM 258901/118, Mei 1984.

LITERATUUR (vervolg)

31. Lindenberg, J.
Stabiliteit van Armorflex - steenzetting onder golfaanval.
WL/LGM, verslag modelonderzoek M1910, Jan. 1983.
32. Weide, J. van de en Visser, P.
Basalton, stabiliteit onder golfaanval.
WL/LGM, verslag modelonderzoek M1900, Febr. 1983.
33. Burger, A.M.
Taludbekleding van gezette steen, fase 2.
Grootschalig gidsonderzoek.
WL/LGM, verslag modelonderzoek M1795/M1881 deel IX, Dec. 1983.
34. Waterloopkundig Laboratorium, Laboratorium voor Grondmechanica.
Grootschalig onderzoek t.b.v. de Oesterdam.
Verslag modelonderzoek, M1795 deel VI, Juli 1982.
35. Rijn, L.C. van
Sediment transport.
Part II: Suspended load transport.
Delft Hydraulics, Publication No. 334, Febr. 1985.
36. Chow, Ven te,
Open-Channel Hydraulics
McGraw-Hill, New York, 1959.
37. Damsgaard, A. et al.
Northumberland causeway. Model test on filters.
Trondheim, Techn. Univ. Norway, River and Harbour Laboratory,
Bulletin No. 13E, 1971.
38. Brink, W.E., en Oldenziel, D.M.,
Invloed van grondwaterstroming op begin van beweging van zand;
Waterloopkundig Laboratorium, verslag SIII, 1972

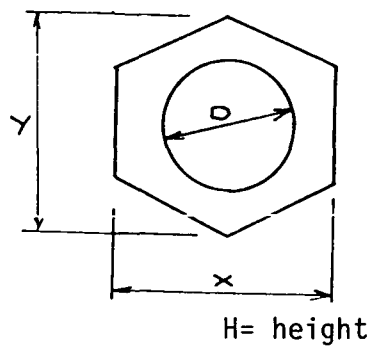
LITERATUUR (vervolg)

39. Verruijt, A.,

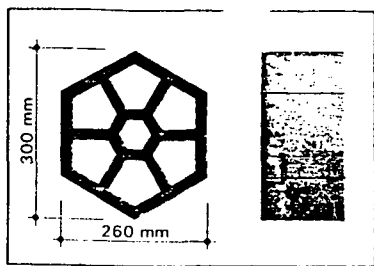
Theory of groundwater flow

Macmillan, Civil Engineering Hydraulics Series, 1969

SEABEE



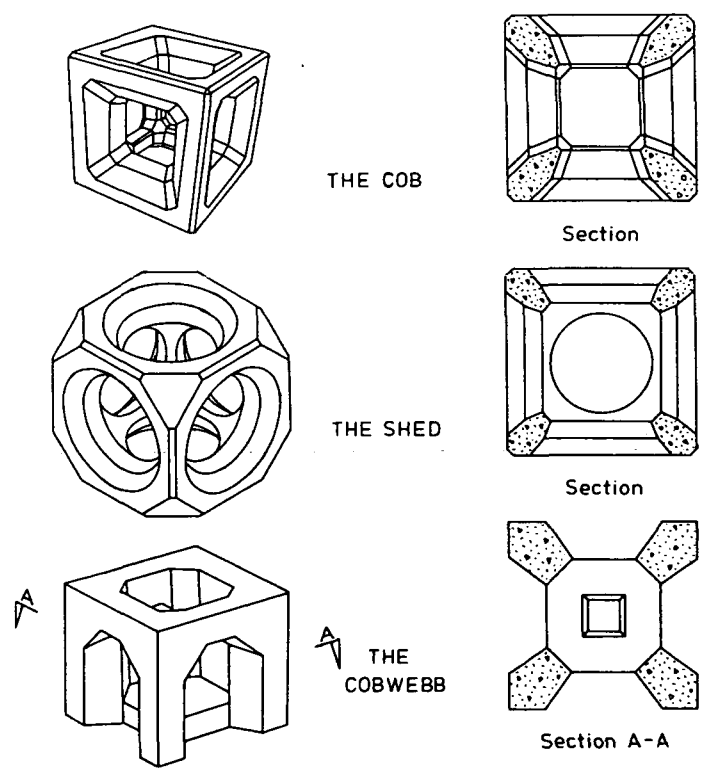
| model | DIMENSION | | | |
|-------|-----------|----|----|----|
| | x | y | D | H |
| A | 16 | 17 | 10 | 19 |
| B | 16 | 17 | 10 | 37 |
| C | 58 | 60 | 33 | 24 |



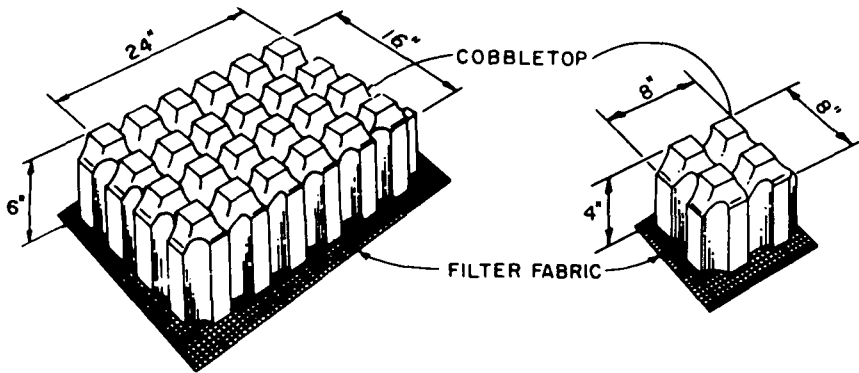
TECHNICAL DATA

| | |
|------------------------|--------------------|
| WEIGHT | 7 kg/100 mm length |
| SURFACE POROSITY | 47% |
| MATERIAL POROSITY | 7% |
| SPECIFIC GRAVITY | 2.1 - 2.3 |
| No. PER m ² | 17 |

TYPES OF HOLLOW ARMOUR BLOCKS

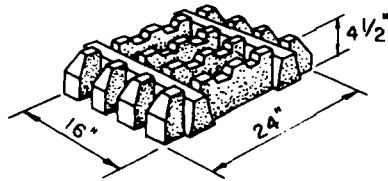


ENKELE BLOKTYPEN (A)

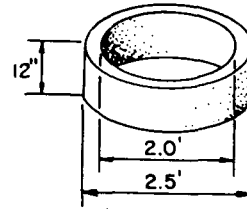


JUMBO BLOCK

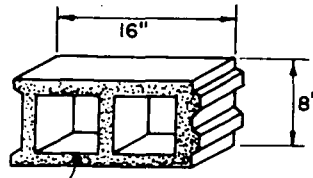
GOBI (ERCO) BLOCK



**MONOSLAB
(TURFBLOCK)**

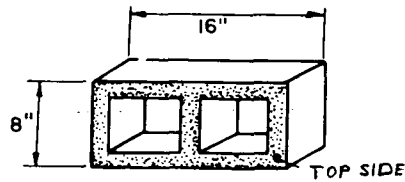
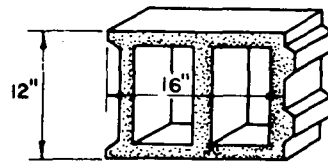


NAMI RING



TOP SIDE

CONTROL BLOCKS



TOP SIDE

STANDARD CONSTRUCTION BLOCK

ENKELE BLOKTYPEN (B)

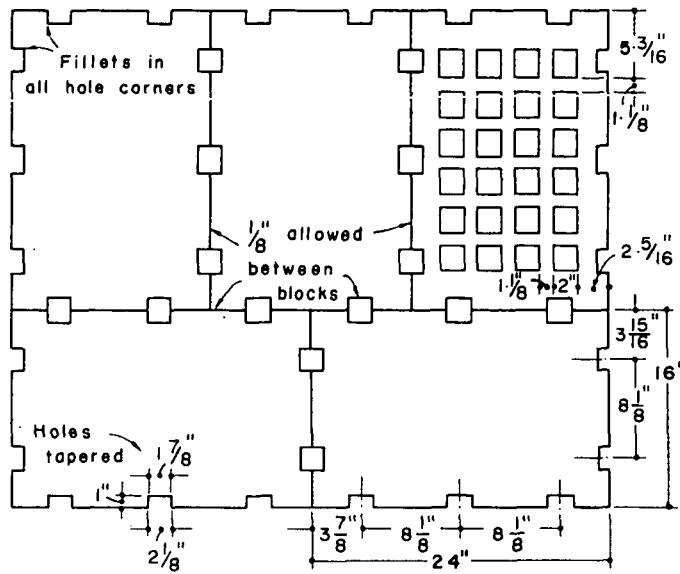
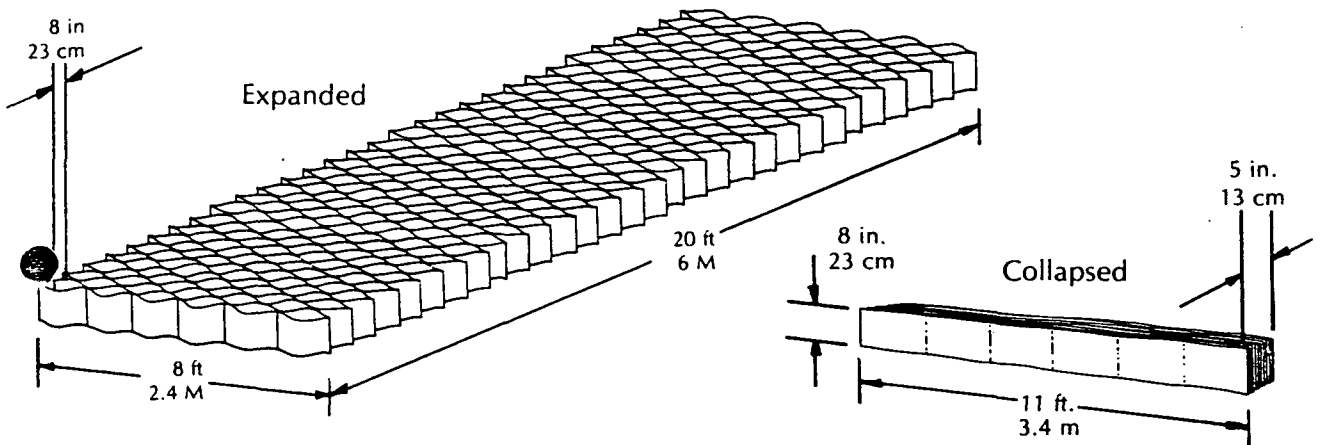


FIG. 5.—SIZE AND GROUPING OF CELLULAR REVETMENT BLOCKS



FIG. 6.—PRECAST CELLULAR REVETMENT BLOCKS BEING PLACED BY HAND

CELLULAR REVETMENT BLOCK



GEOWEB Structural Properties

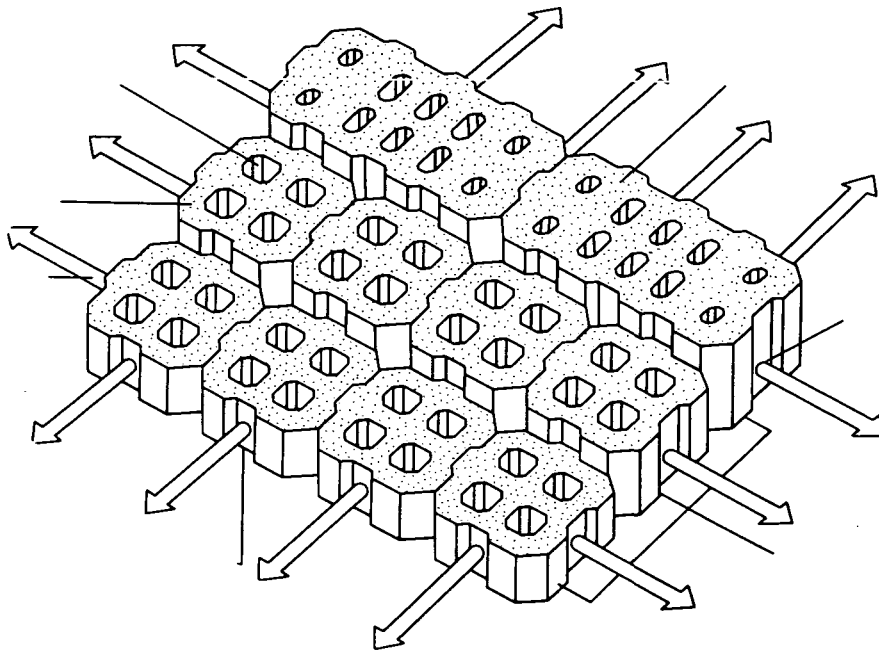
English System

Metric System

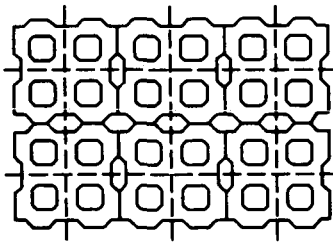
| GEOWEB Structural Properties | English System | Metric System |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Expanded Dimension | 8 ft. x 20 ft. x 8 in. | 2.5 m x 6 m x 2.3 cm |
| Collapsed Dimension | 11 ft. x 5 in. x 8 in. | 3.4 m x 13 cm x 23 cm |
| Panel Thickness Nominal | 0.047 in. | 0.119 cm |
| Weight | 5.7 lb/yd ² | 3.1 kg/m ² |
| Cell Area | 41 in. ² | 265 cm ² |
| Cell Seam Node Pitch | 13 in. | 33 cm |
| Nodes/Seam | 7 | 7 |
| Seams Tensile Peel Strength | 150 lbs. | 69 kg |
| Installation Temperature Range | -16°F to 110°F | -27°C to 43°C |

GEOWEB

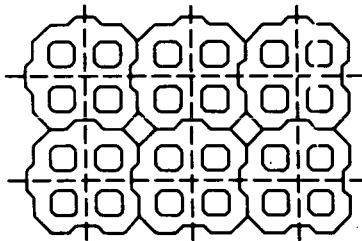
Various size blocks illustrated



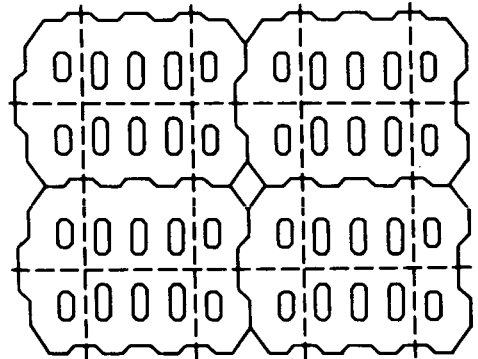
H41212
(For maximum grass affect)



H41212(i) & H51212(i)
(Intermeshed)

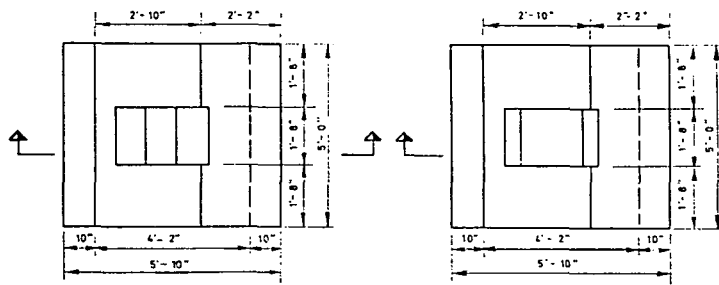
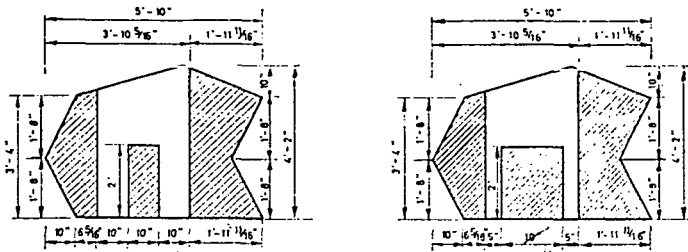


H91824(i) - (Intermeshed)

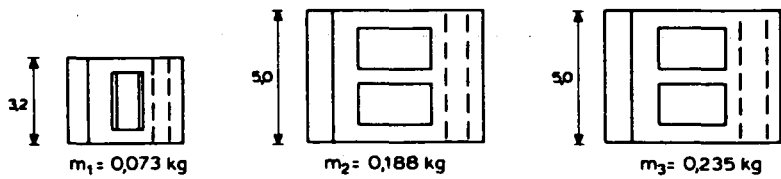
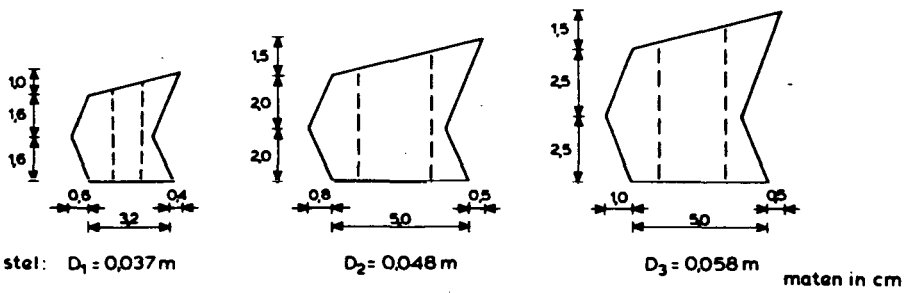


| TYPE: | Unit Coverage | Thickness | Unit Weight (Nominal) | Superficial Weight (Nominal) | Panel Open Area | |
|------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|--|-----------------|------|
| | | | | | Top | Base |
| H41212(i) | 305mm (12") × 305mm (12") | 95mm (3¾") | 15 Kg. (33 lbs.) | 160 Kg./m ² (33 lbs./ft. ²) | 35% | 23% |
| H51212(i) | 305mm (12") × 305mm (12") | 135mm (5¼") | 23 Kg. 51 lbs.) | 250 Kg./m ² (51 lbs./ft. ²) | 32% | 15% |
| H91824(i) | 460mm (18") × 610mm (24") | 220mm (8¾") | 116 Kg. (256 lbs.) | 415 Kg./m ² (85 lbs./ft. ²) | 28% | 15% |
| H41212 | 305mm (12") × 305mm (12") | 100mm (4") | 14 Kg. 31 lbs.) | 150 Kg./m ² (31 lbs./ft. ²) | 38% | 32% |
| H51224 | 305mm (12") × 610mm (24") | 115mm (4½") | 37 Kg. 81 lbs.) | 200 Kg./m ² (40 lbs./ft. ²) | 30% | 20% |
| H91824 | 457mm (18") × 610mm (24") | 220mm (8¾") | 100 Kg. (220 lbs.) | 360 Kg./m ² (73 lbs./ft. ²) | 35% | 20% |

PETRAFLEX

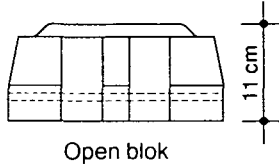
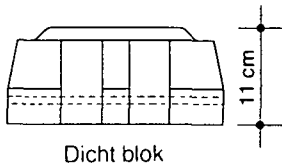
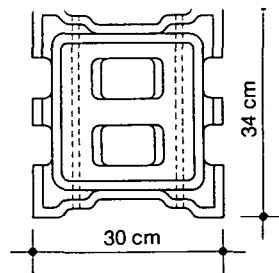
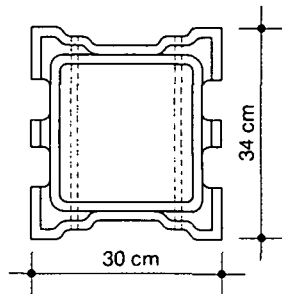


Prototype measures are given in feet and inches.



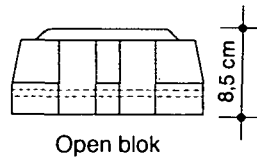
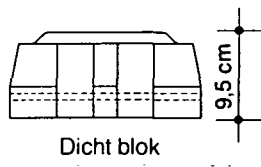
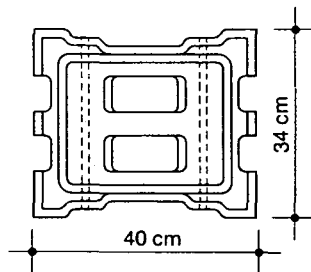
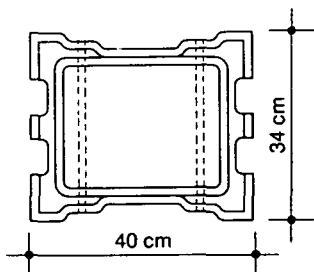
modelblokken

SVEE-BLOK



Dicht blok

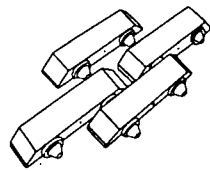
Open blok



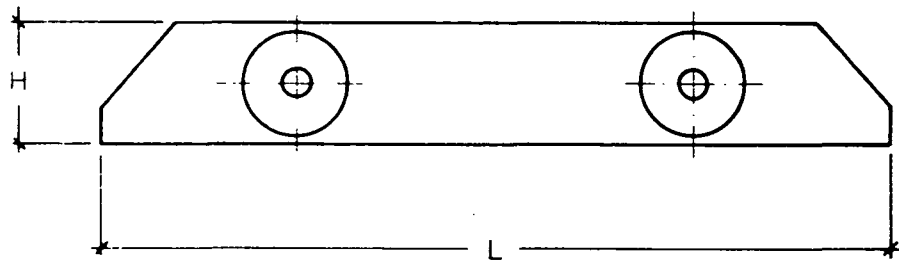
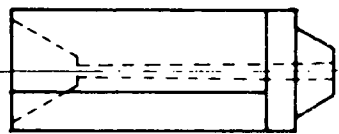
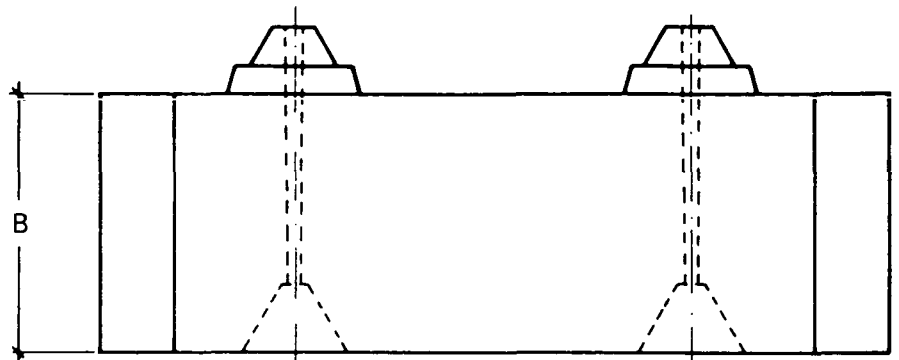
Dicht blok

Open blok

ARMORFLEX



G TERRAFIX - BLOCKS

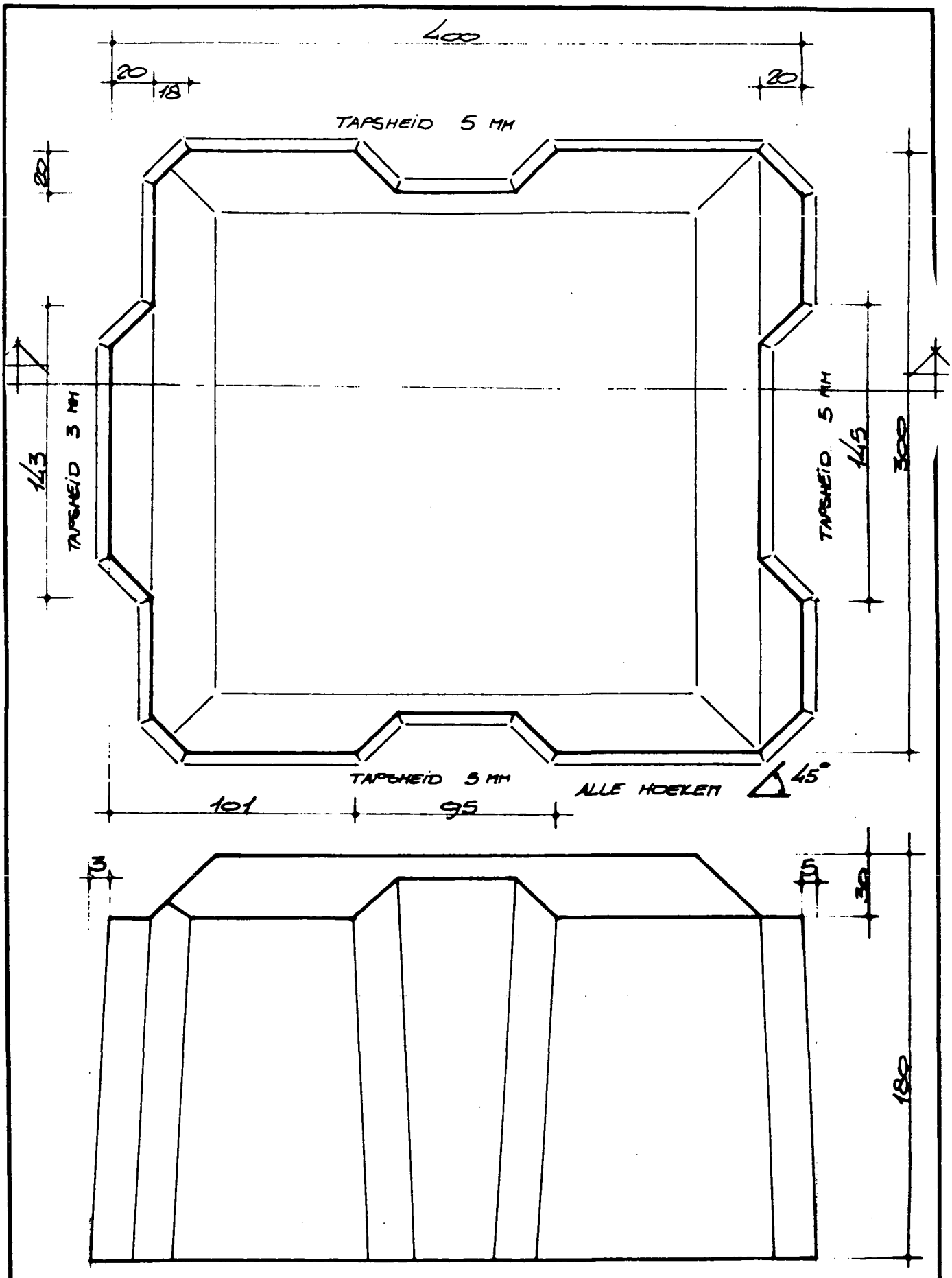


TECHNISCHE GEGEVENS*

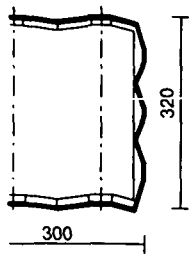
| Type | | nv 8 A | NV 10 A | NV 15 A |
|------------------------------|----|---------------|----------------|----------------|
| Lengte (L) | mm | 550 | 550 | 660 |
| Breedte (B) | mm | 170 | 170 | 140 |
| Hoogte (H) | mm | 80 | 100 | 150 |
| Gewicht per stuk (ca.) | kg | 17 | 21,5 | 27,5 |
| Stenen/m ² (ca.) | — | 9,1 | 9,1 | 9,33 |
| Gewicht/m ² (ca.) | kg | 155 | 190,5 | 255,5 |
| Betonkwaliteit | — | NEN 7024 | NEN 7024 | NEN 7024 |
| Begroeibaarheid | — | zeer goed | zeer goed | zeer goed |

* Verdere typen in ontwikkeling

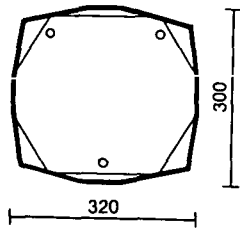
Terrafix®



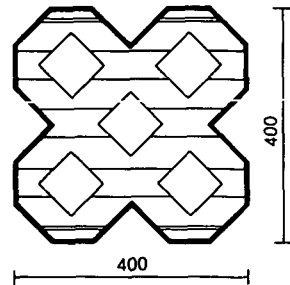
BLOKTYPE W VAN IDEAL B.V.



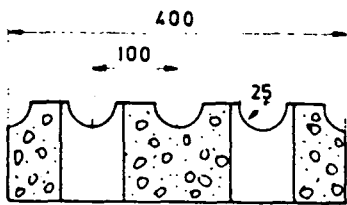
BETOMAT® KA-VB



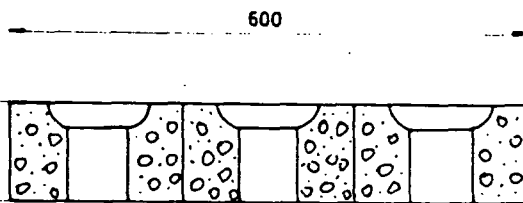
BETOMAT® PE-BA



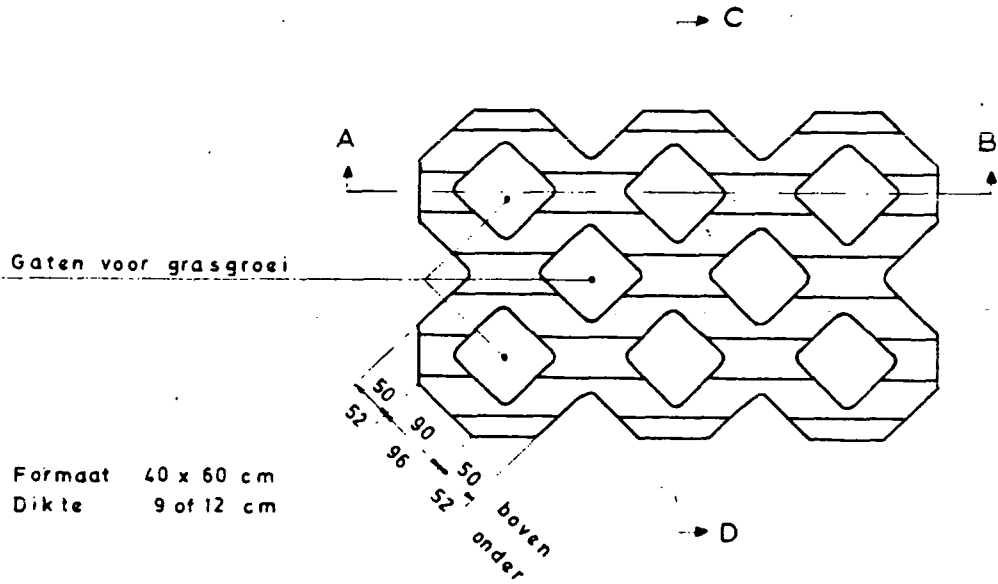
BETOMAT® PE-GR



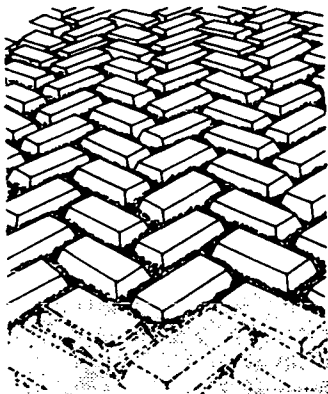
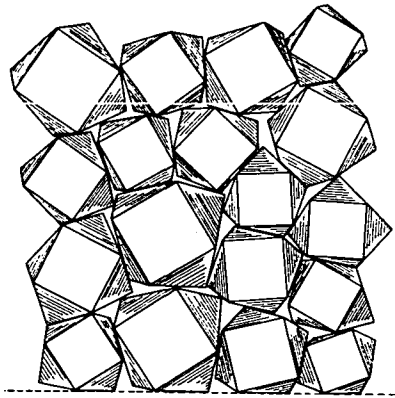
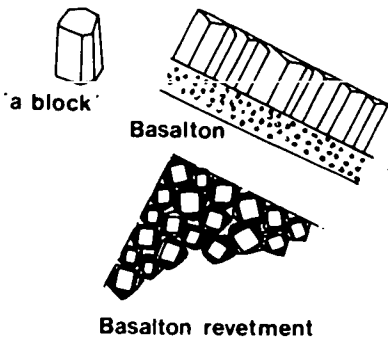
Doorsnede C-D



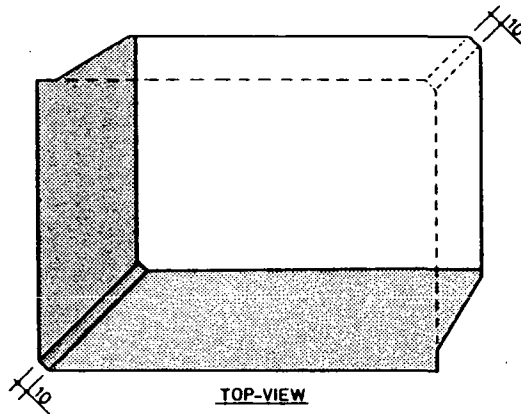
Doorsnede A-B



BETOMAT EN SYSTEEM GOBI

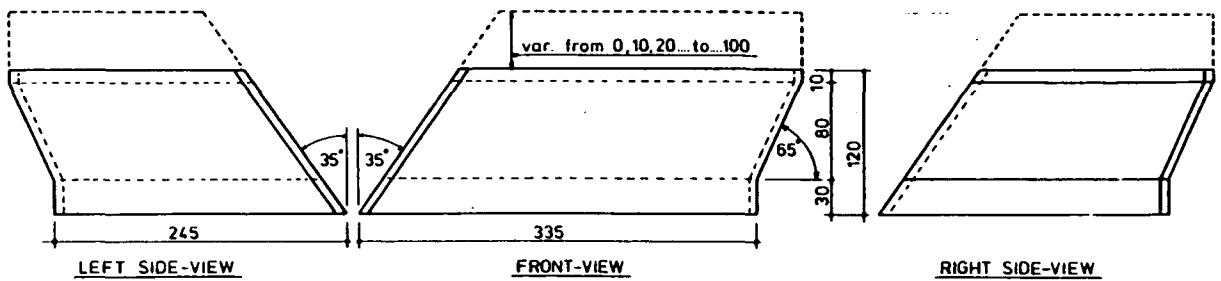


ACZ - Delta mat

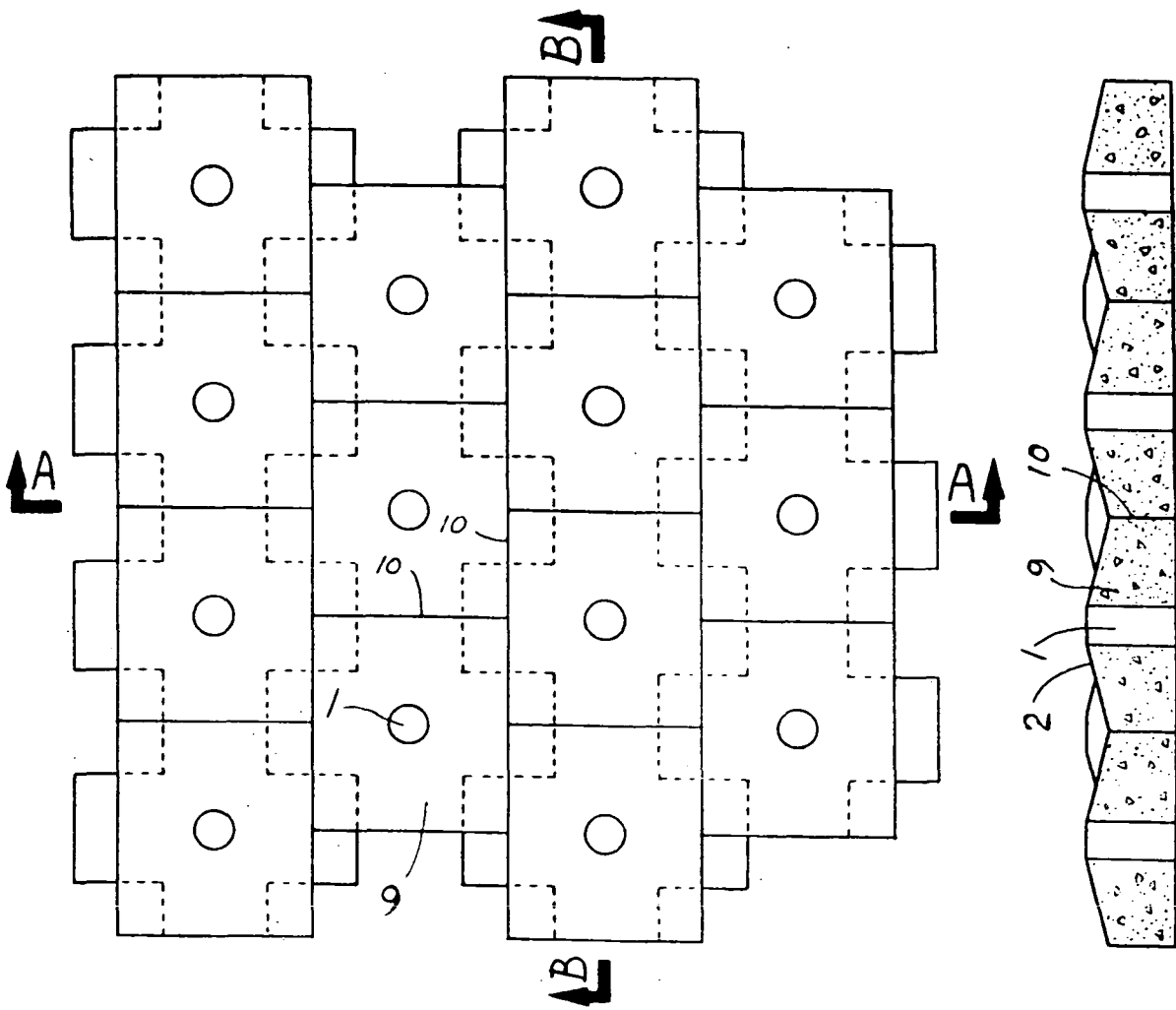


TOP-VIEW

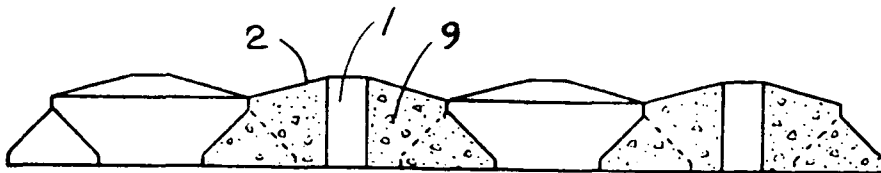
dimensions in millimeters



BASALTON EN DELTA-MAT



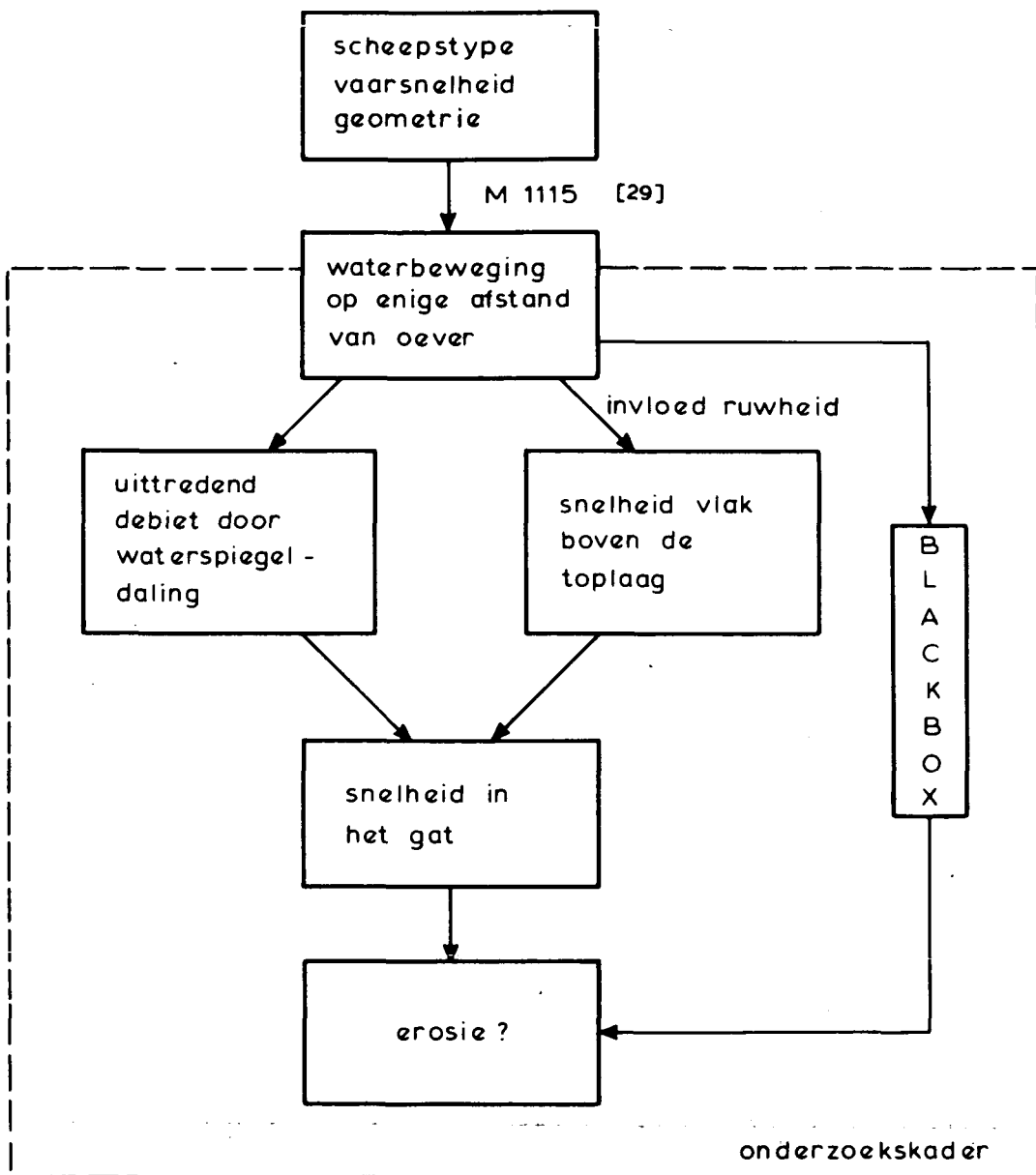
PLAN



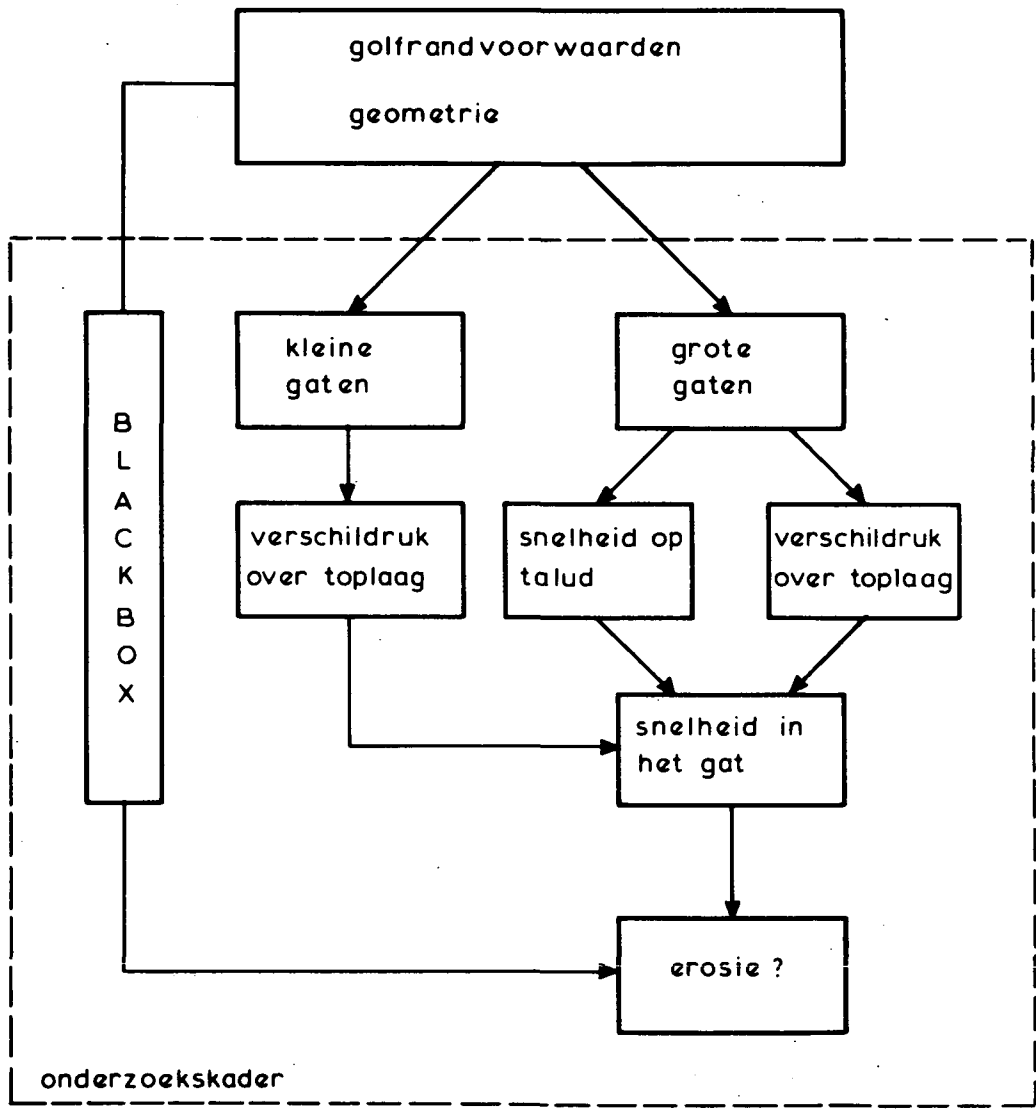
SECTION A-A

SECTION B-B

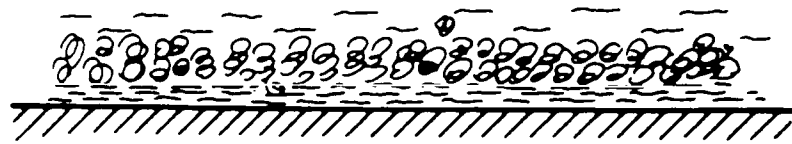
SYSTEM O'HEA



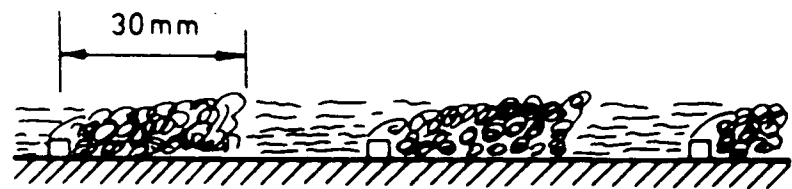
SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK
MET BETREKKING TOT OEVERS



ONDERZOEKSKADER MET BETREKKING
TOT DJUKEN



(a) Smooth Turbulent Flow



(b) Semismooth Turbulent Flow



(c) Nonuniform Hyperturbulent Flow



(d) Uniform Hyperturbulent Flow



(e) Semi-Quasi-Smooth Flow

dead water



(f) Quasismooth Flow

bron: Knight/Mac. Donald [12]

STROMINGSOMSTANDIGHEDEN BIJ
KUNSTMATIGE RUWHEID

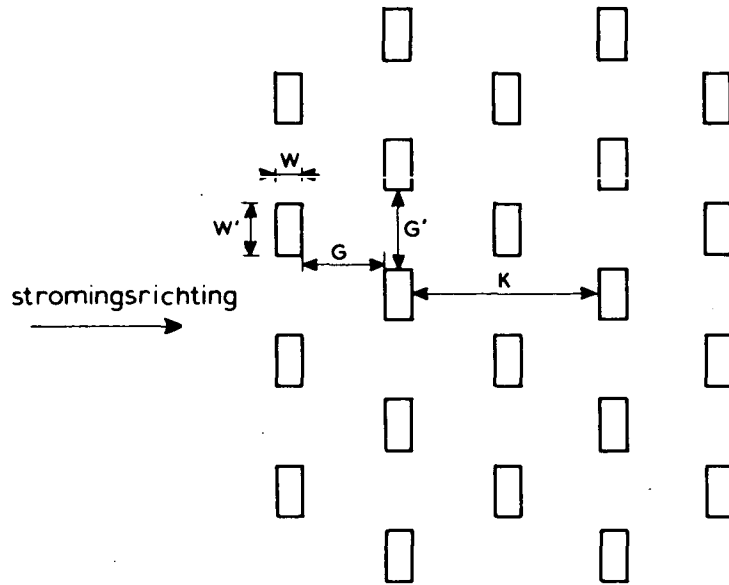
DELFT HYDRAULICS LABORATORY

H 657

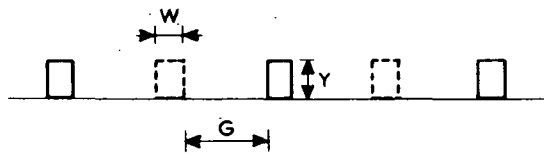
FIG. 15

A. KUNSTMATIGE RUWHEIDSELEMENTEN

BOVENAANZICHT

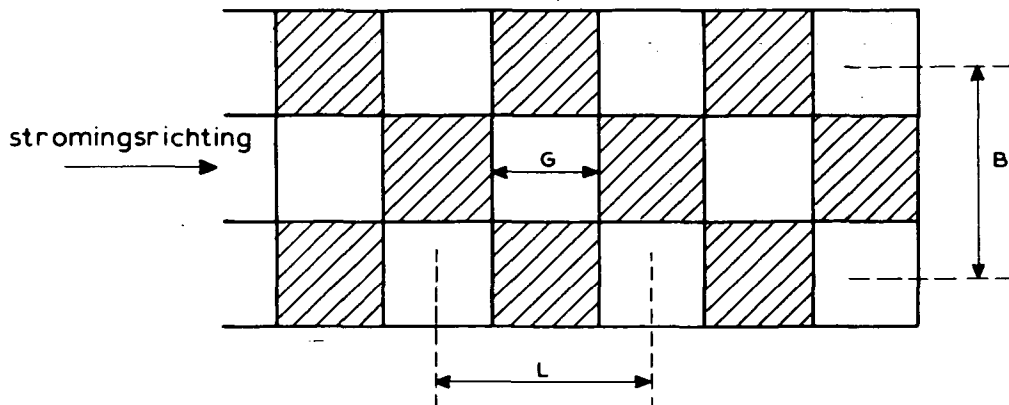
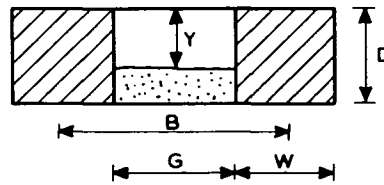


LENGTEDOORSNEDE

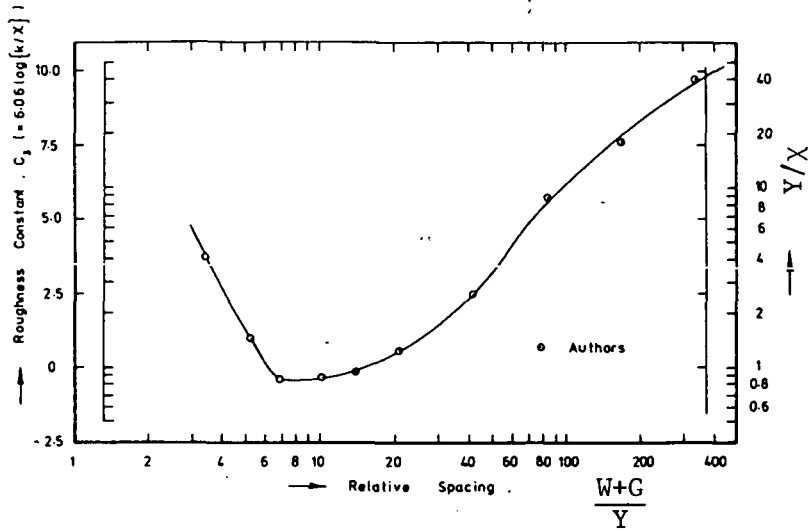


B. BEKLEDING MET GATEN

stromingsrichting →



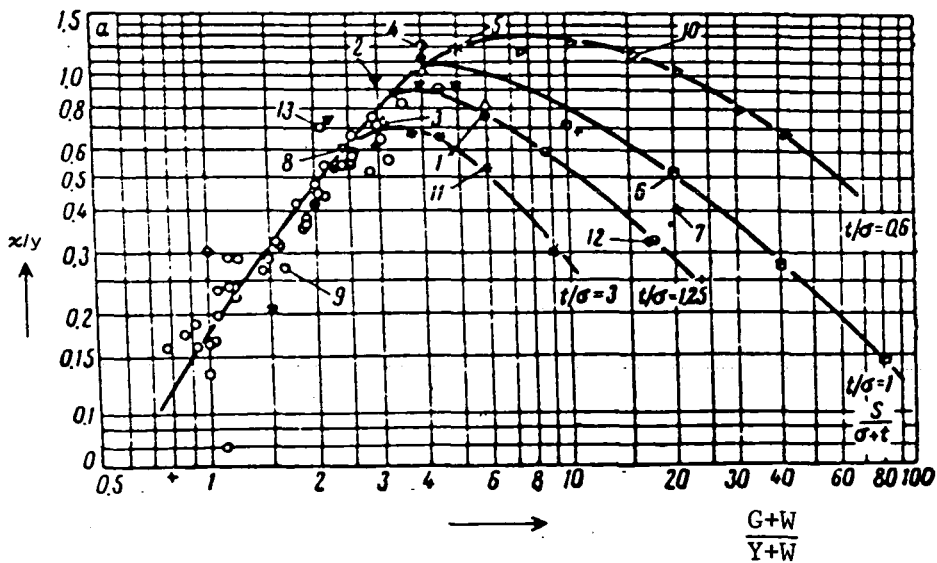
DEFINITIE VAN GEOMETRISCHE PARAMETERS



N.B. $\chi = 0,094 \cdot k_s^{0,95} \cdot h^{0,05}$ of $k_s = 12 \cdot \chi^{1,053} \cdot h^{-0,053}$

Ryabov [15]

- Verklaring cijfers: 1 t/m 5, 8 t/m 11 - Russische metingen
 6 Powell (zie ook figuur 18)
 7 Tripp and Johnson
 12 Smith and Warren
 13 Bazin (zie ook figuur 18)

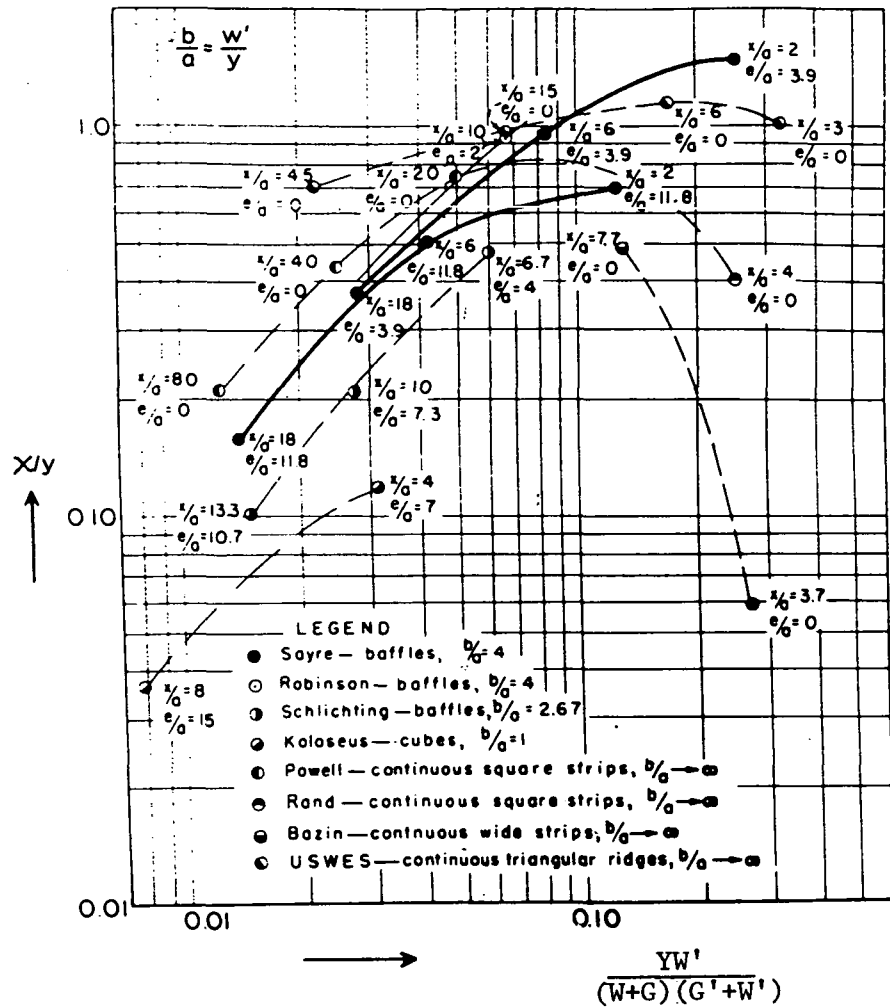


de betekenis van de symbolen is verklaard in FIG. 16

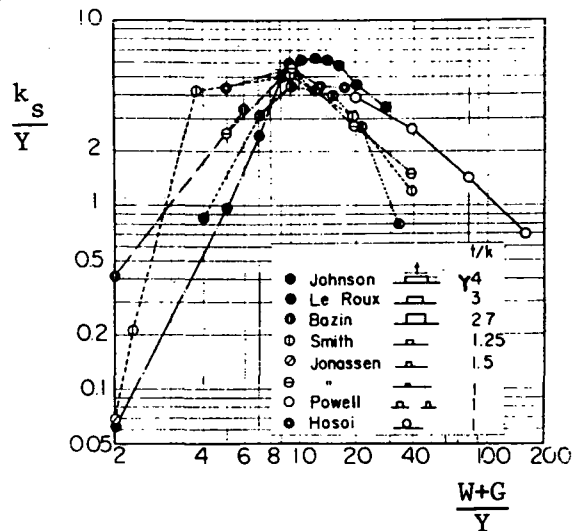
N.B. $\chi = 0,144 \cdot k_s^{0,78} \cdot h^{0,22}$ of $k_s = 12 \chi^{1,28} \cdot h^{-0,28}$

RELATIE TUSSEN RUWHEIDSPARAMETER EN GEOMETRISCHE
 PARAMETERS, KNIGHT/MACDONALD EN RYABOV

$$\frac{x}{a} = \frac{K+W}{Y} \quad \frac{e}{a} = \frac{G'}{Y}$$



de betekenis van de symbolen is verklaard in FIG. 16



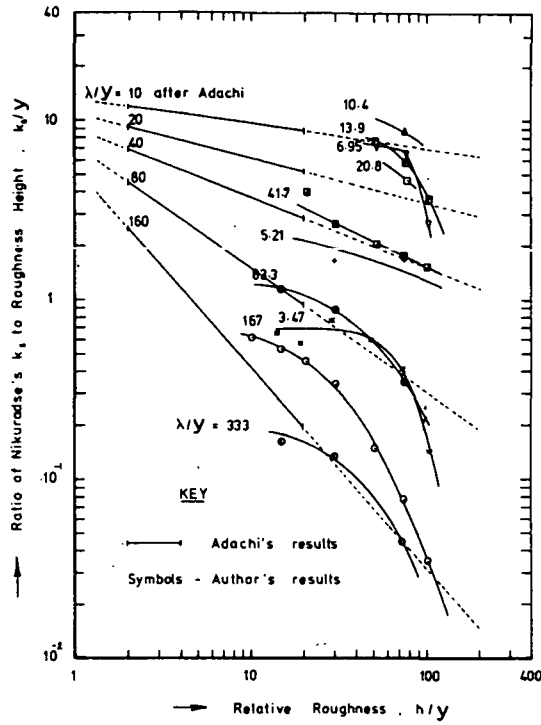
verklaring symbolen



B = breedtestroom-goot

$$t = \frac{h}{B}$$

RELATIE TUSSEN RUWHEIDSPARAMETER EN GEOMETRISCHE
PARAMETERS, SAYRE/ALBERTSON EN ADACHI



Relatie tussen ruwheidshoogte en Nikuradse's ruwheid.

Adachi [13]

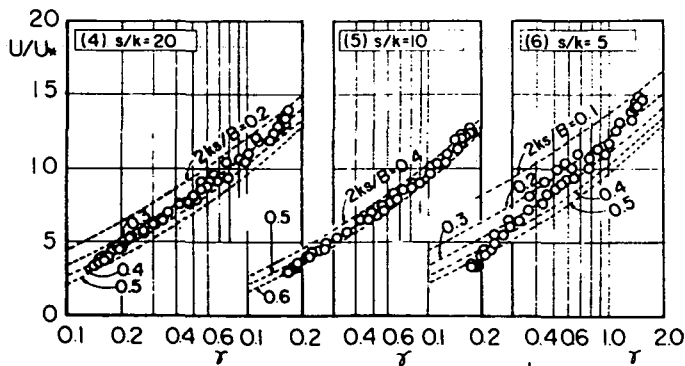
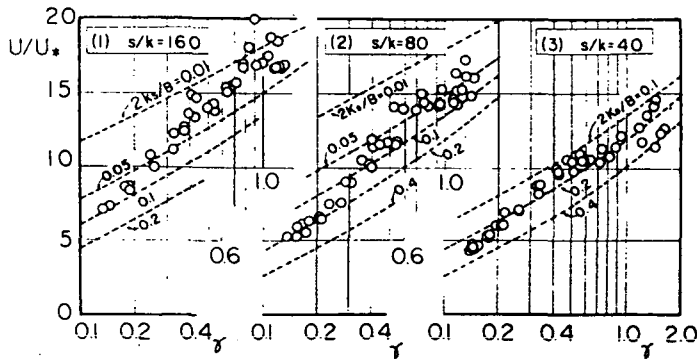
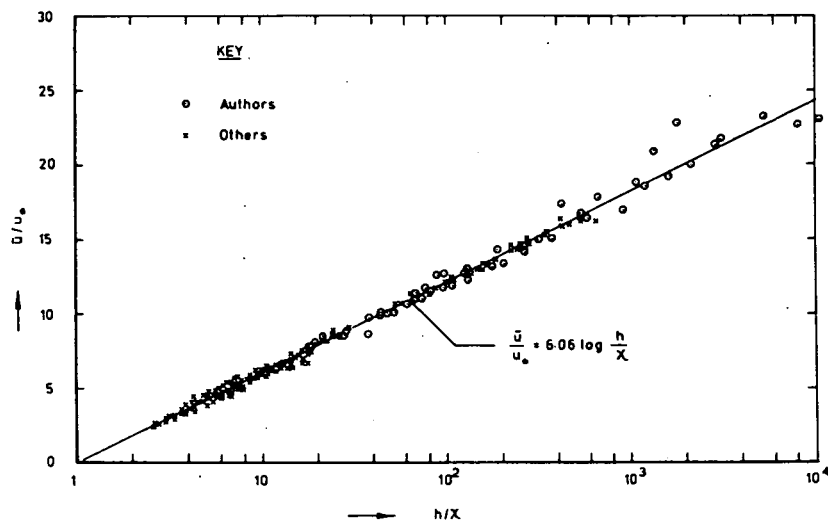


Fig. 2. Relations between U/U_* and τ for various s/k .

RELATIE TUSSEN RUWHEIDSPARAMETERS EN NIKURADSE RUWHEID



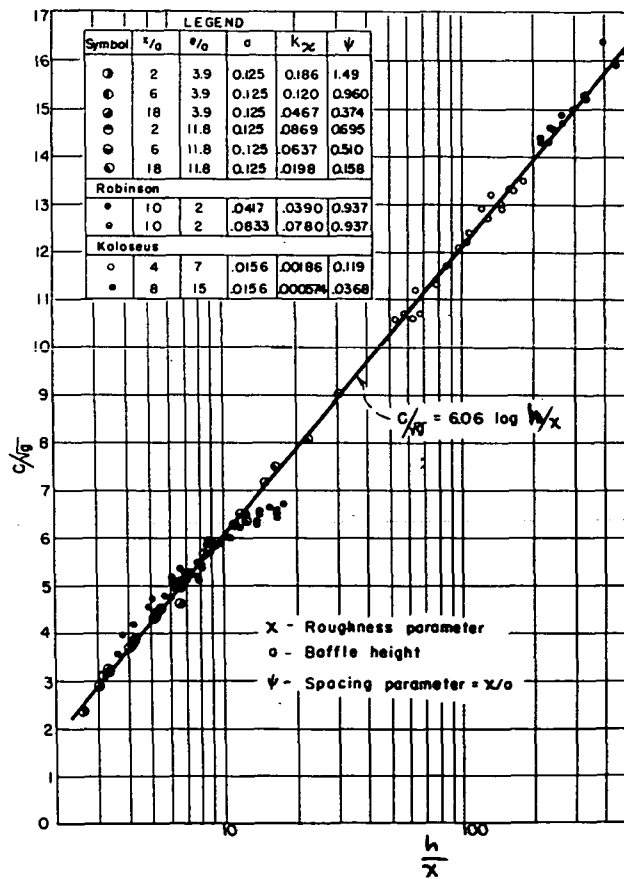
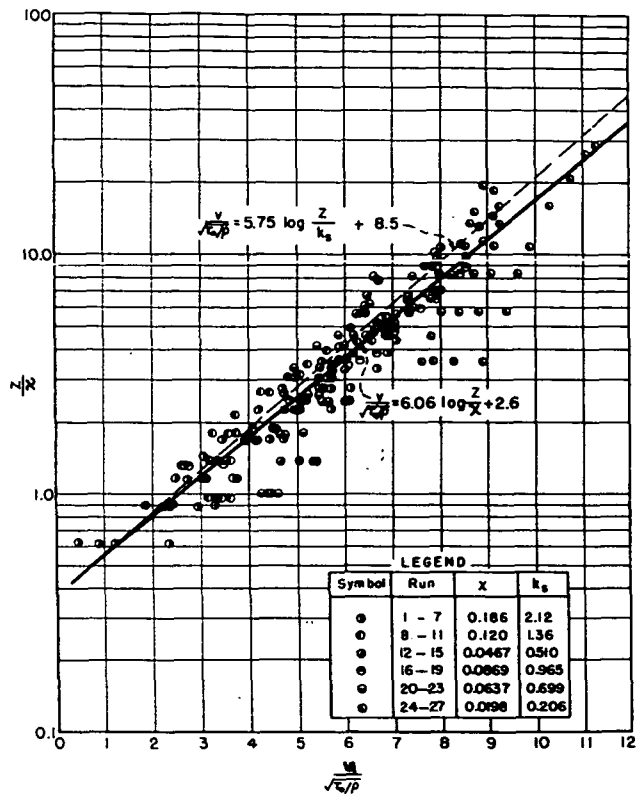
bron : [12]

SNELHEIDSVERDELING VOLGENS KNIGHT/MACDONALD

- WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 20



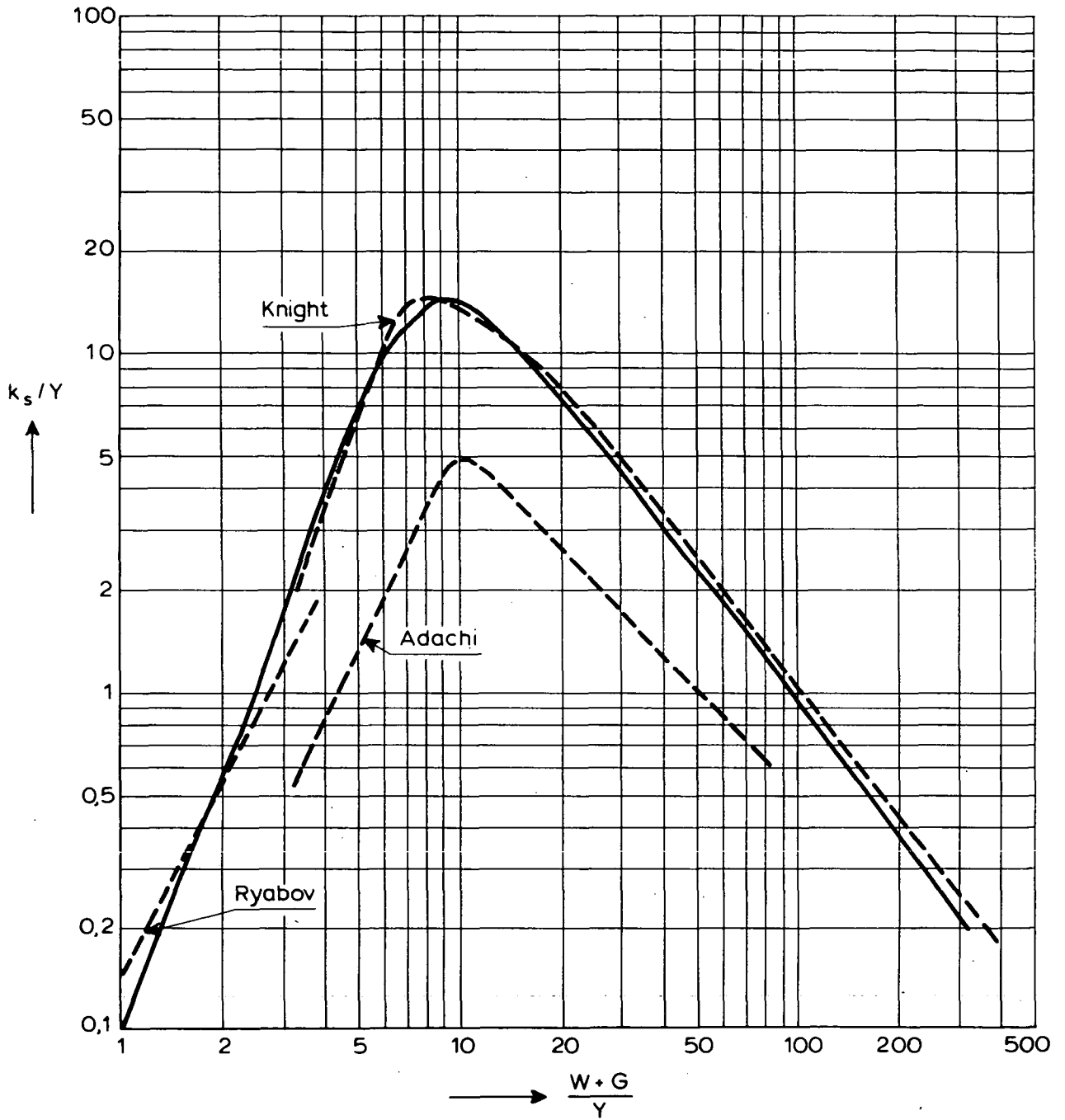
bron : [14]

SNELHEIDSVERDELING VOLGENS SAYRE/ALBERTSON

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 21



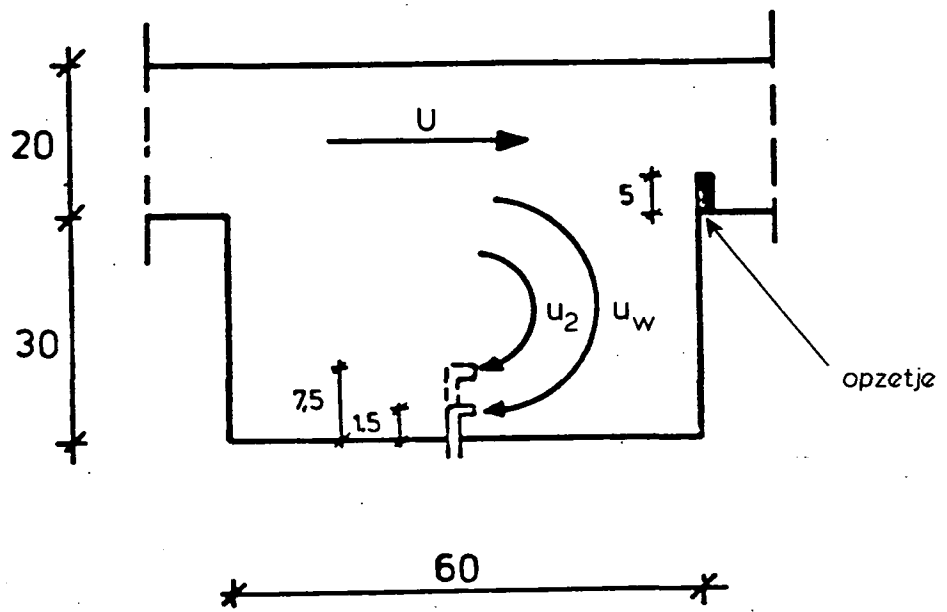
bron: [20]

VERBAND TUSSEN k_s / Y EN $W+G/Y$ VOOR
KUNSTMATIGE RUWHEIDSELEMENTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 22



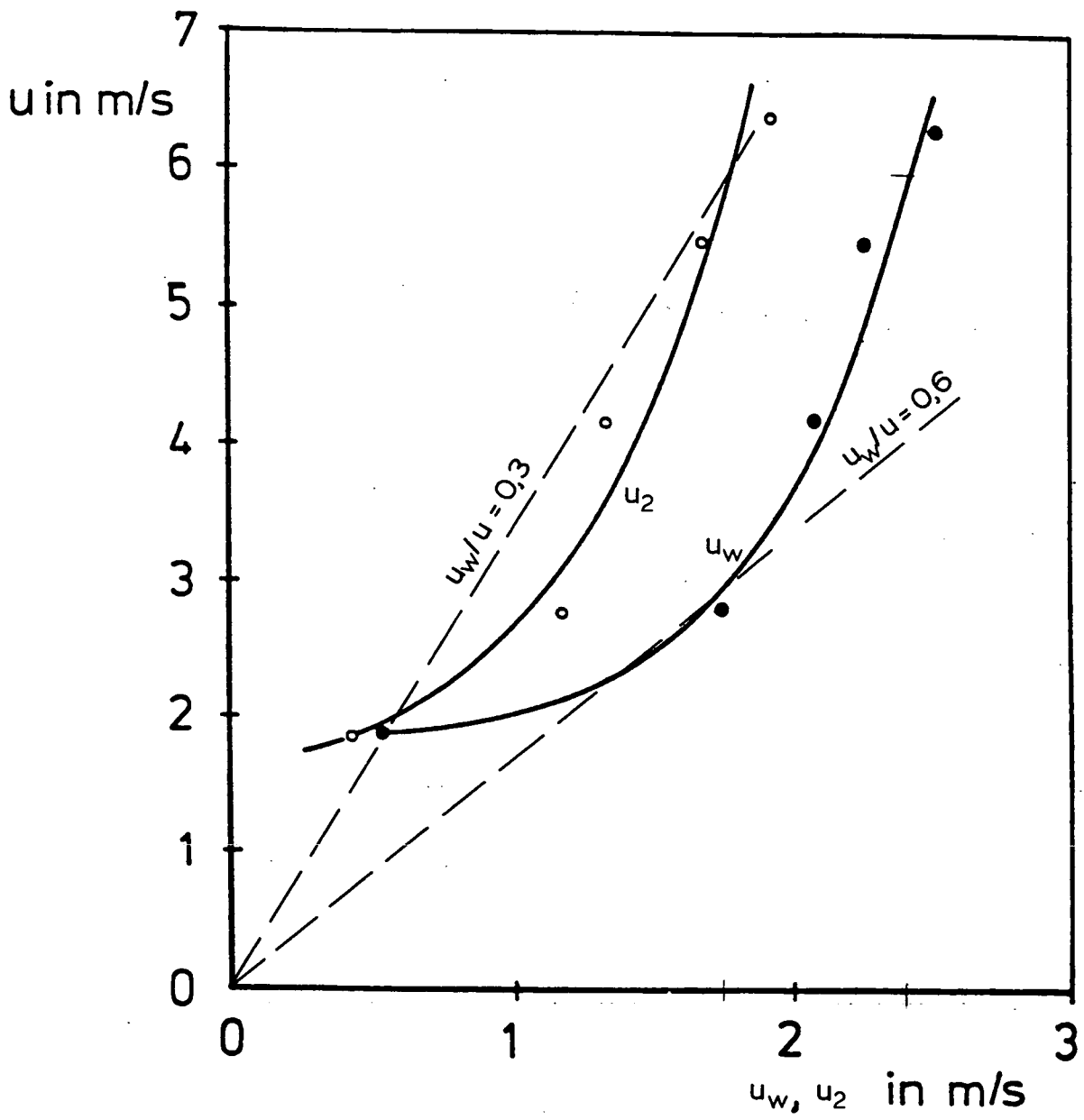
RESULTATEN VAN FUHRBÖTER [1]
SNELHEDEN IN GAT

maten in cm

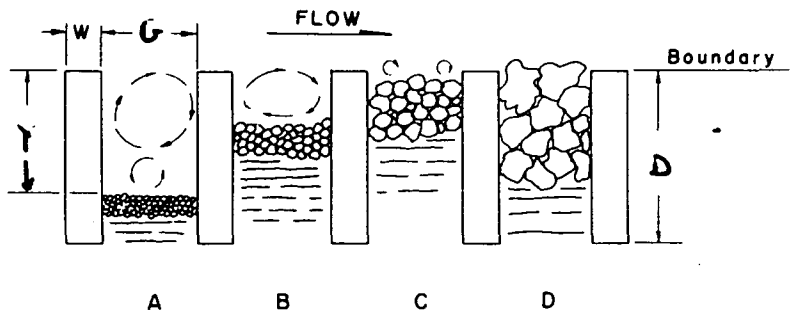
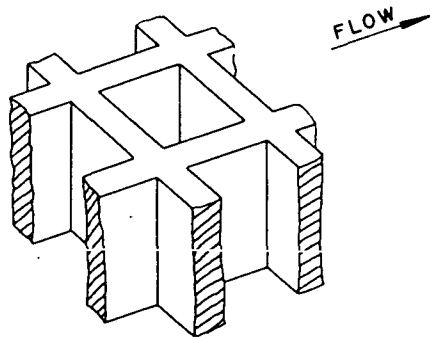
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

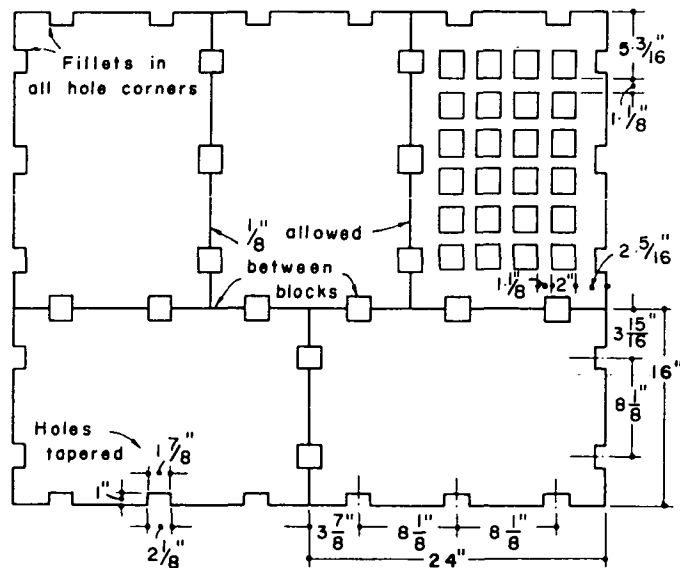
FIG 23



RESULTATEN VAN FÜHRBÖTER [1]
 SNELHEID BOVEN GAT EN IN GAT



model



prototype

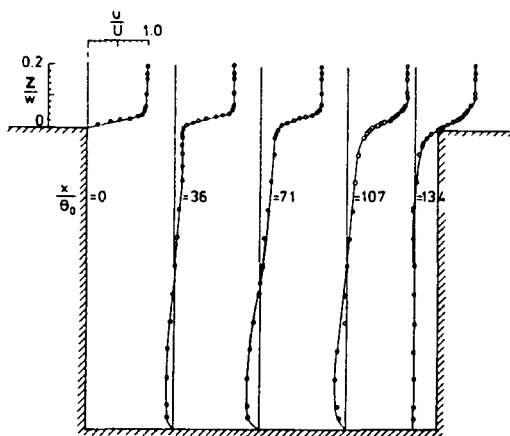
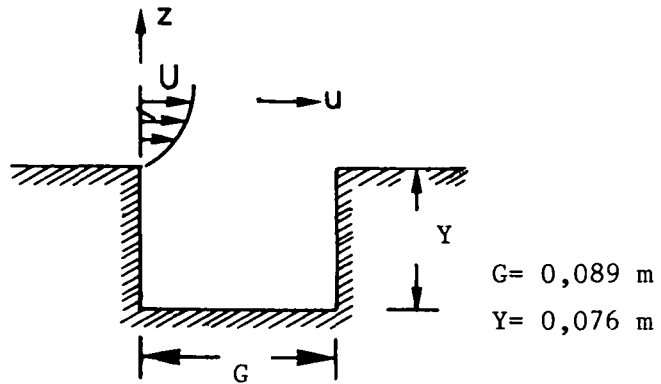
GEGEVENS VAN PARSONS EN APMANN [2]

maten in inches

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

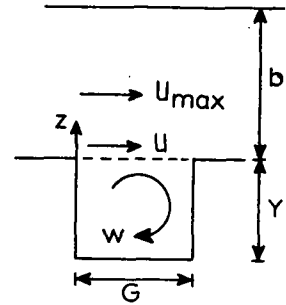
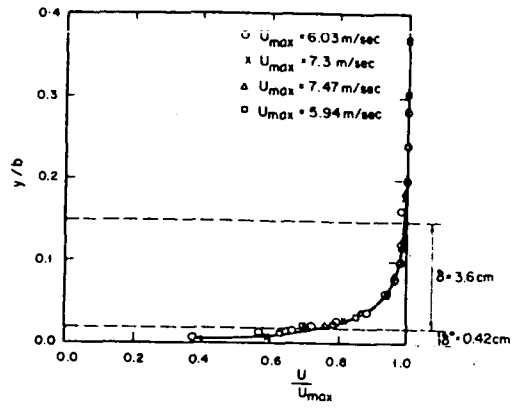
H 657

FIG. 25

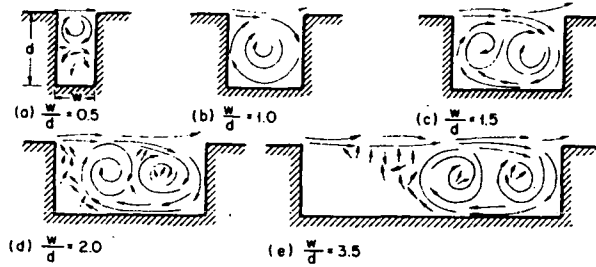


RESULTATEN VAN ROCKWELL EN KNISELY [3]

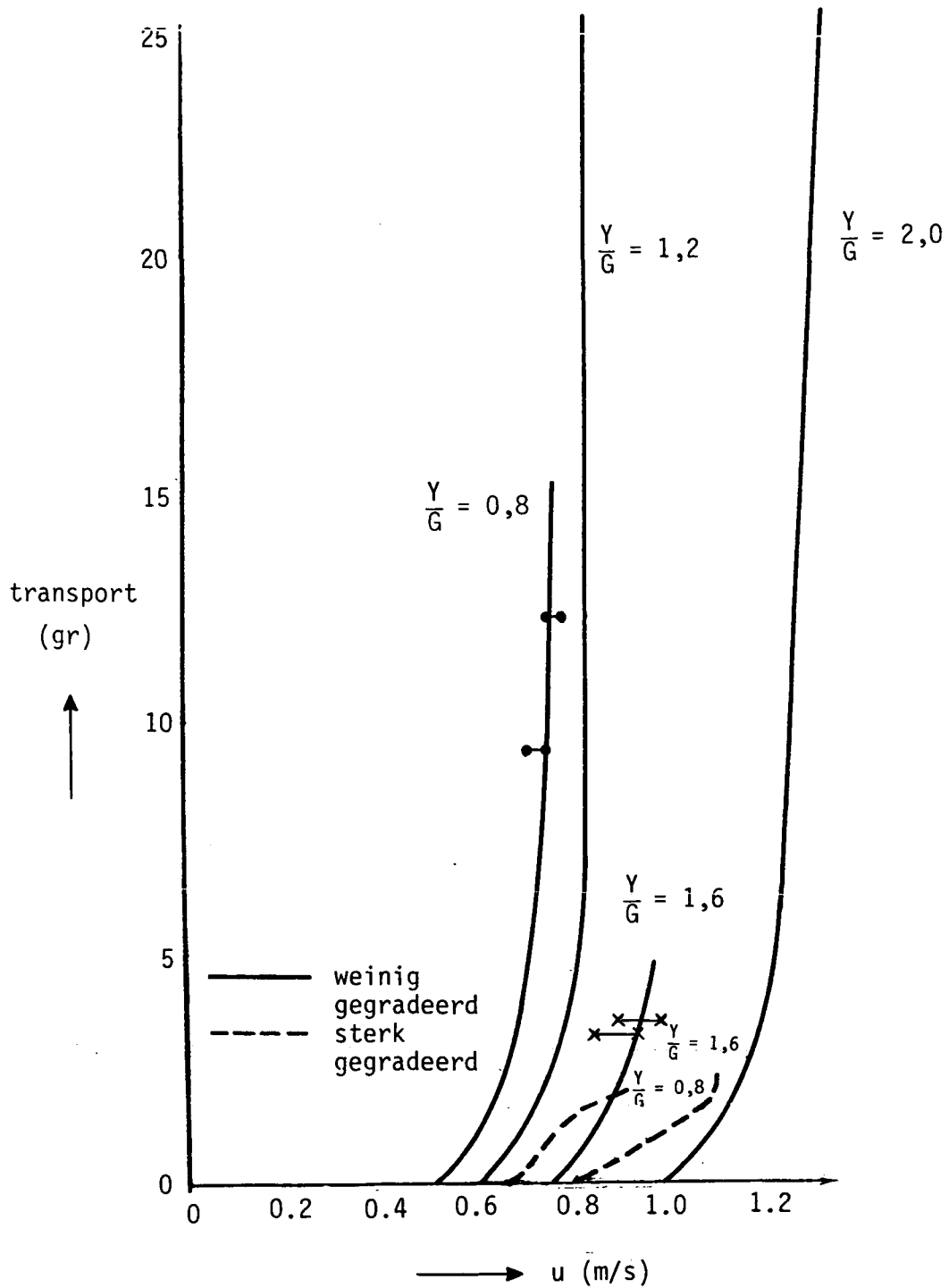
(a)



(b)



$$\frac{W}{d} = \frac{G}{Y}$$

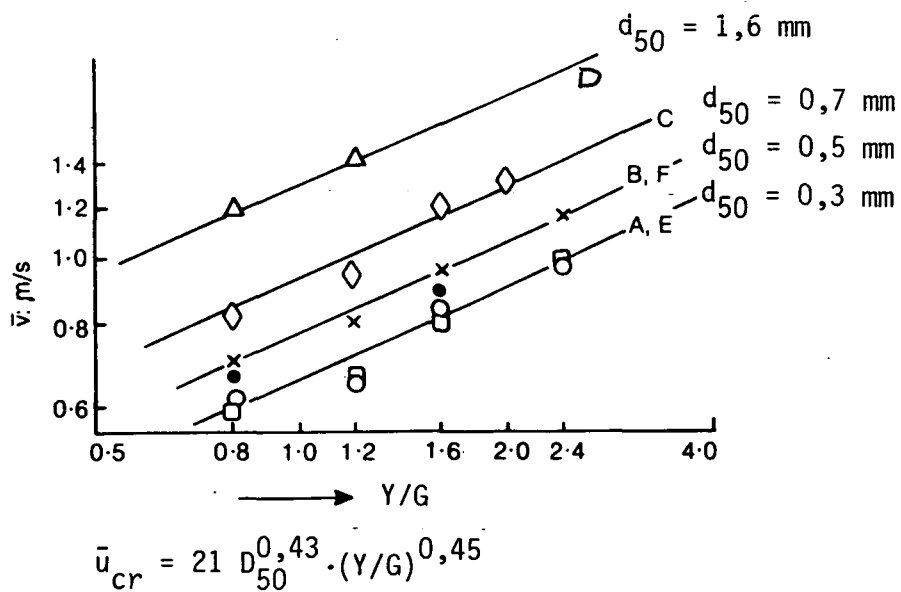


RESULTATEN VAN PAGE [5]

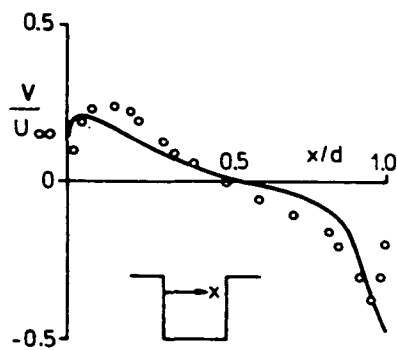
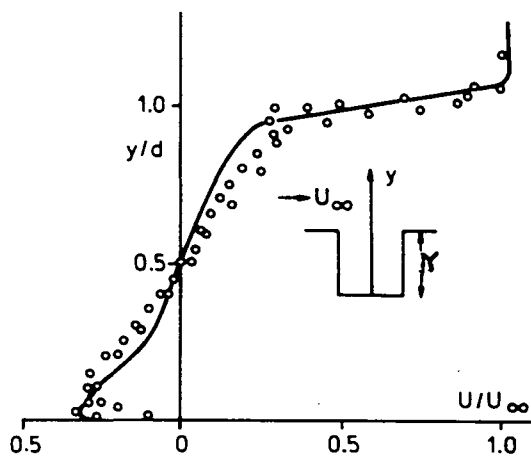
Snelheid boven toplaag bij begin van uitspoeling (m/s)

| TESTER | HANSEN & KEATS | | | | PAGE | |
|--------------------|----------------|-------------|----------|----------|---------------|-------------|
| GRADING | Fine Sand | Graded Sand | 1mm Sand | 2mm Sand | Poorly Graded | Well Graded |
| PARAMETER d_{15} | 0.24 | 0.29 | 0.59 | 1.22 | 0.28 | 0.26 |
| d_{50} | 0.32 | 0.47 | 0.71 | 1.55 | 0.30 | 0.51 |
| d_{85} | 0.41 | 1.55 | 0.98 | 1.82 | 0.41 | 1.10 |

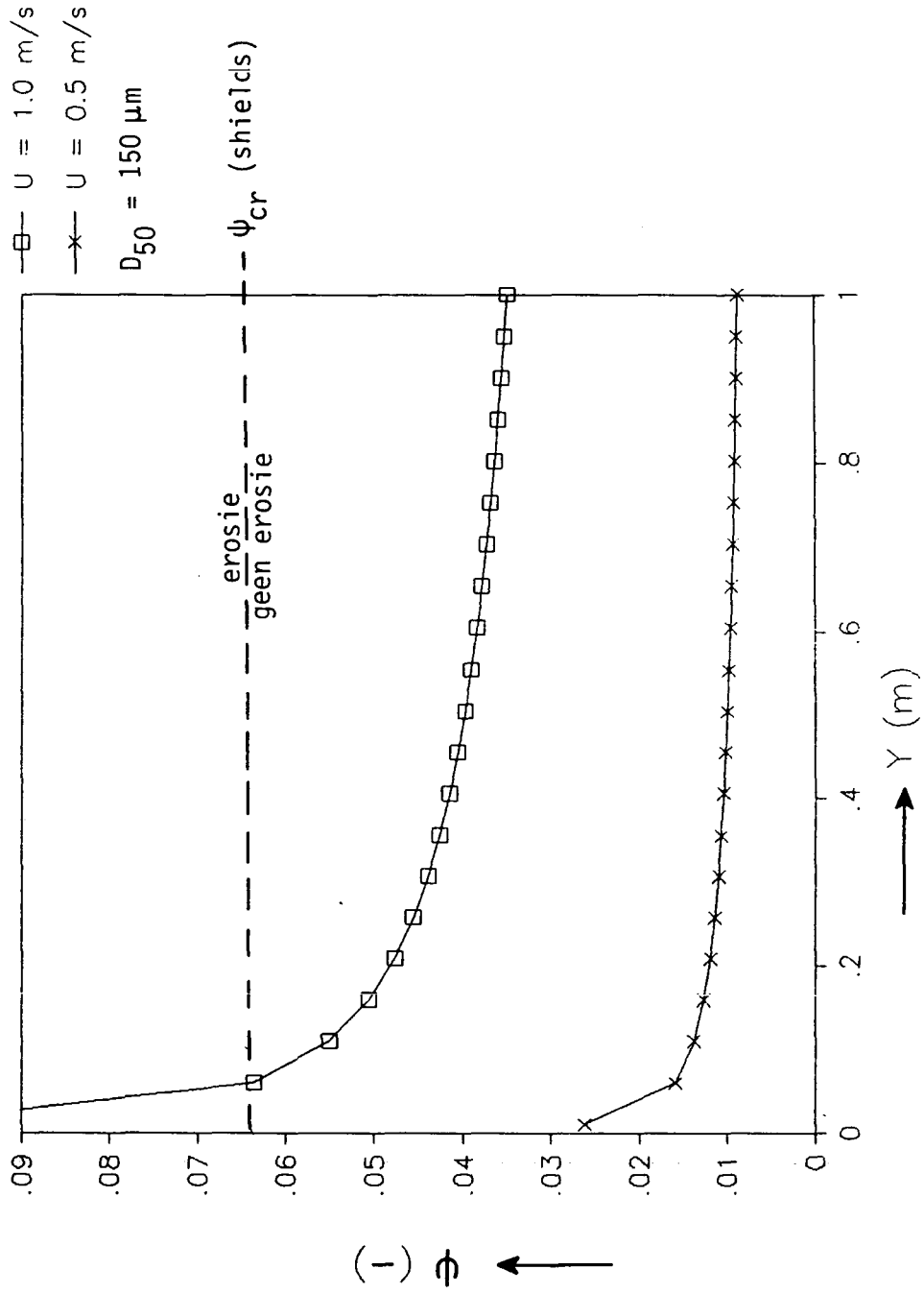
| $\frac{Y}{G}$ | A | B | C | D | E | F |
|---------------|-------|------|------|------|-----|-----|
| 0.8 | .60 | .70 | .82 | 1.19 | .61 | .67 |
| 1.2 | .68 | .80 | .95 | 1.40 | .66 | |
| 1.6 | .80 | .97 | 1.20 | >1.4 | .85 | .90 |
| 2.0 | 1.03 | 1.17 | 1.32 | >1.4 | .99 | |
| 2.4 | | | | | | |
| 4.0 | >1.40 | | | | | |



"BLACK-BOX" MODEL VAN BROWN [19]



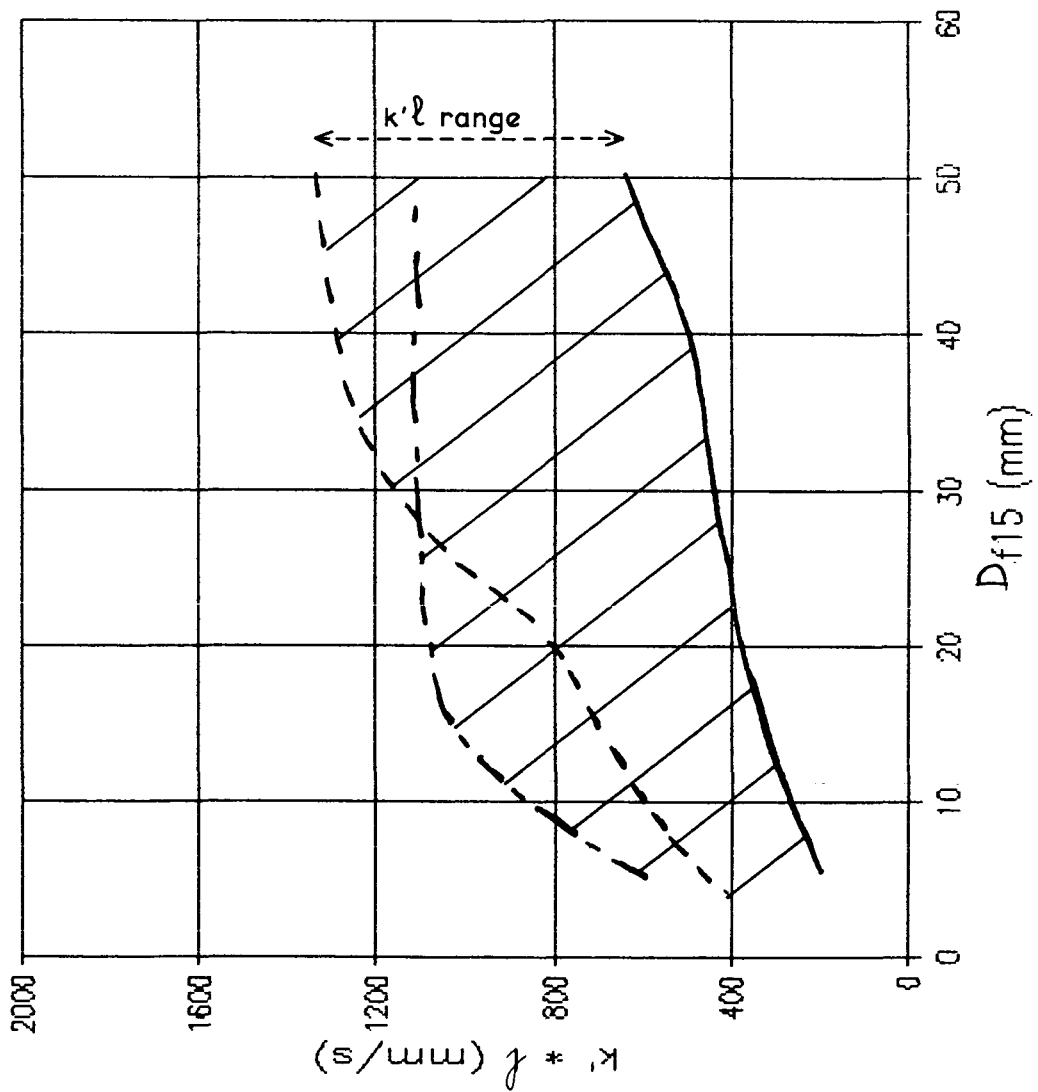
RESULTATEN VAN RODI [6]



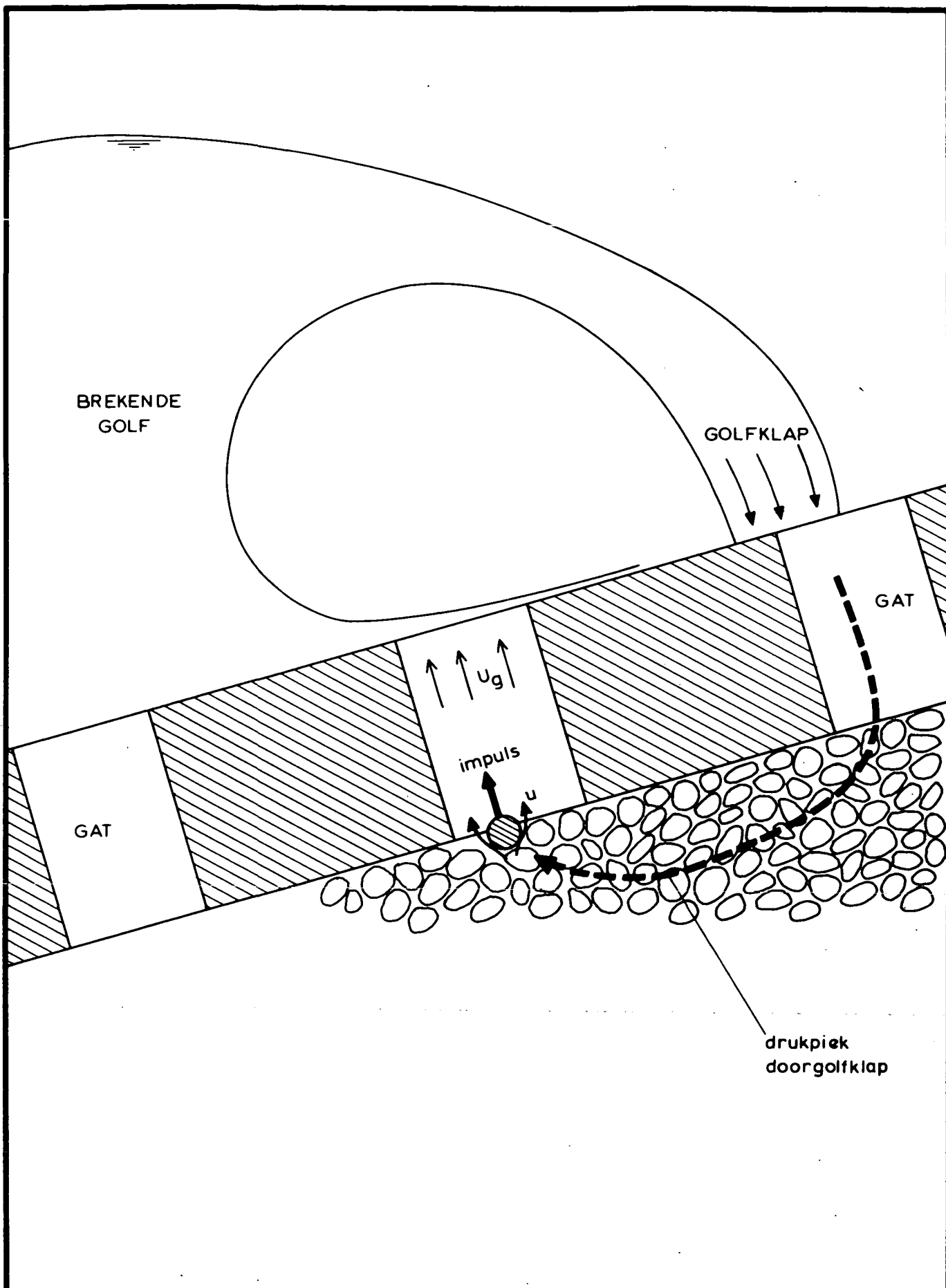
Erosie in blokken met gaten

$$0,2^2 < B'L' < 1$$

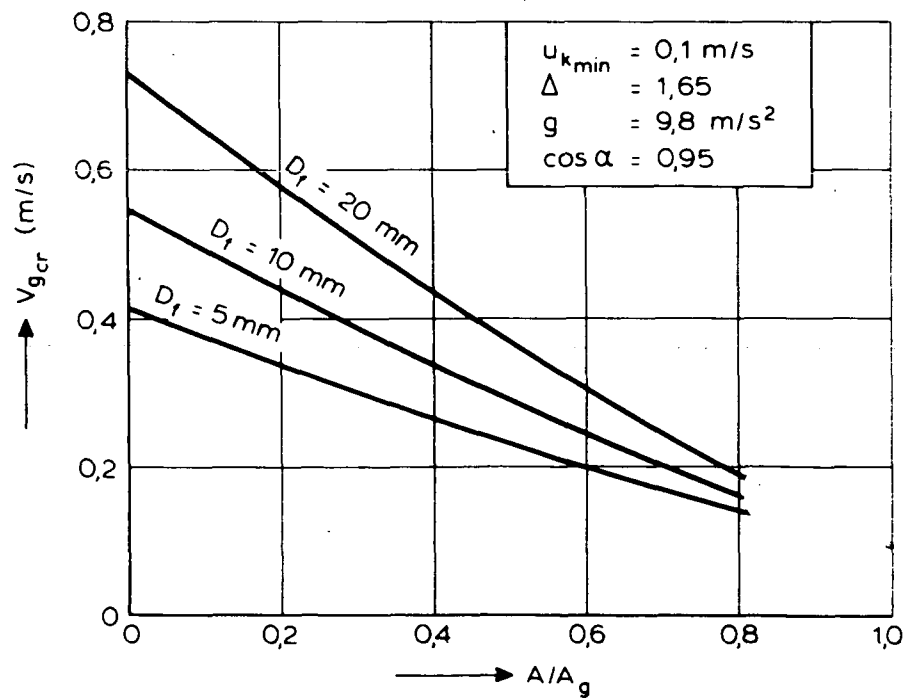
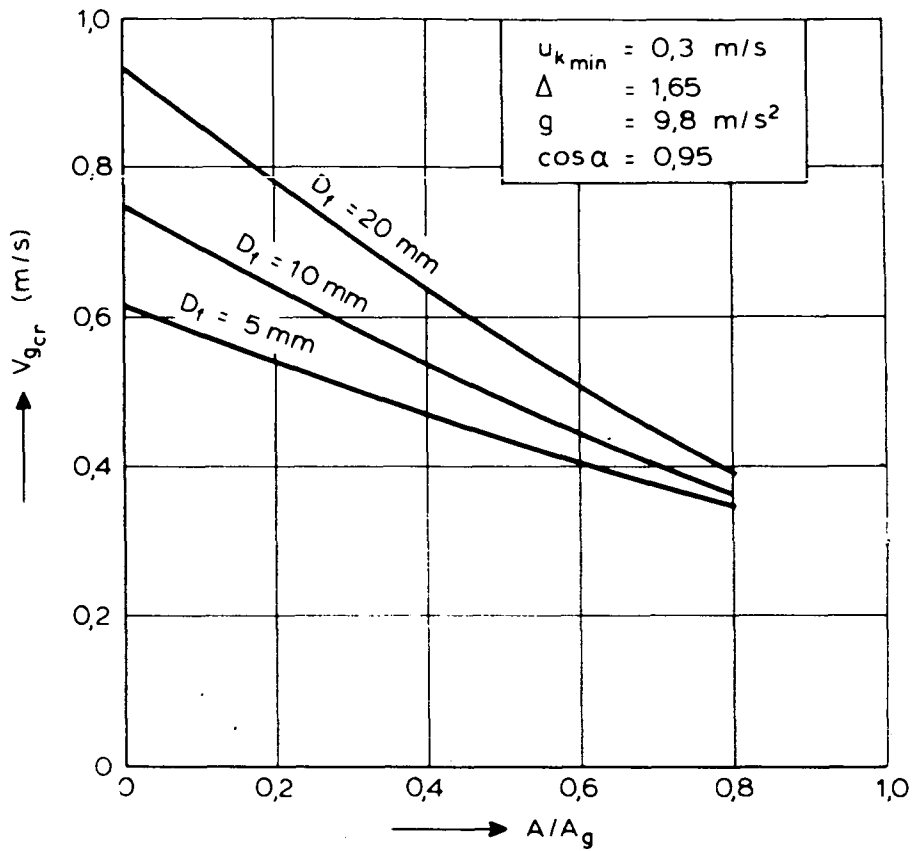
- D= 0,15 m; Ag= 25 cm²
- - - D= 0,4 m; Ag= 6 cm²
- · - · D= 0,4 m; Ag= 1 cm²



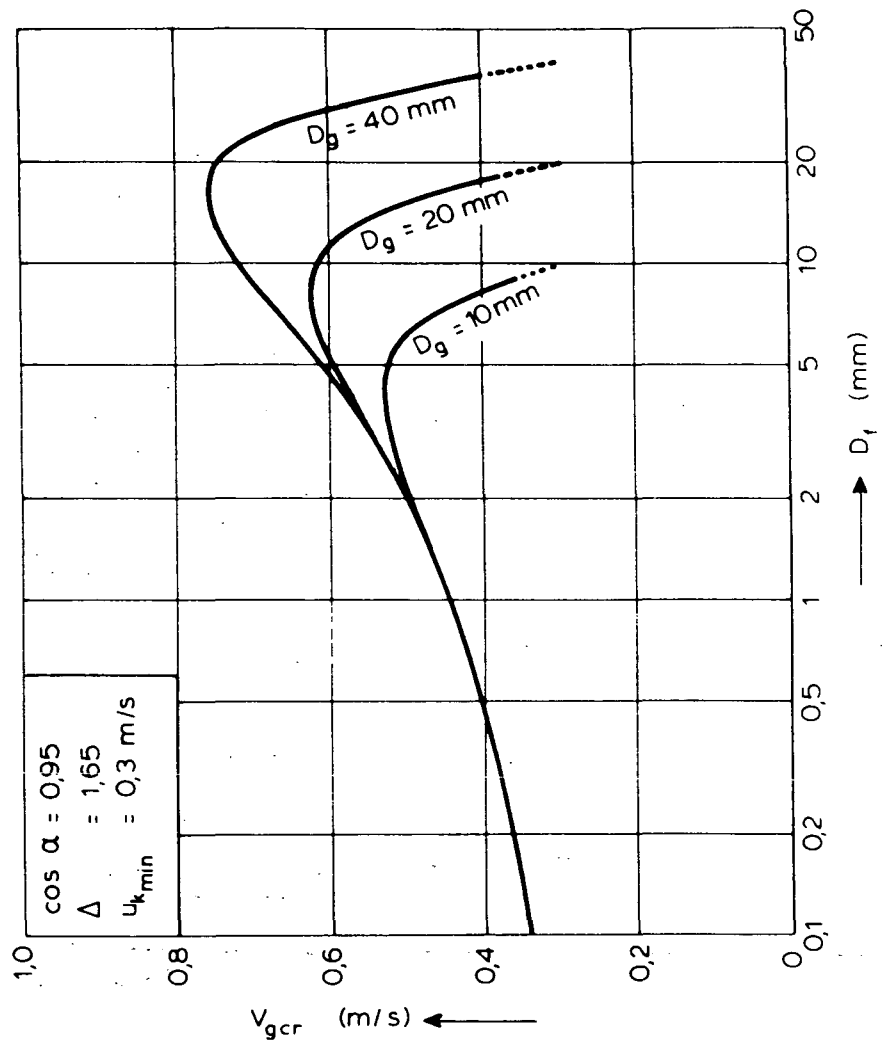
$k'l$ ALS FUNKTIE VAN D_{f15}



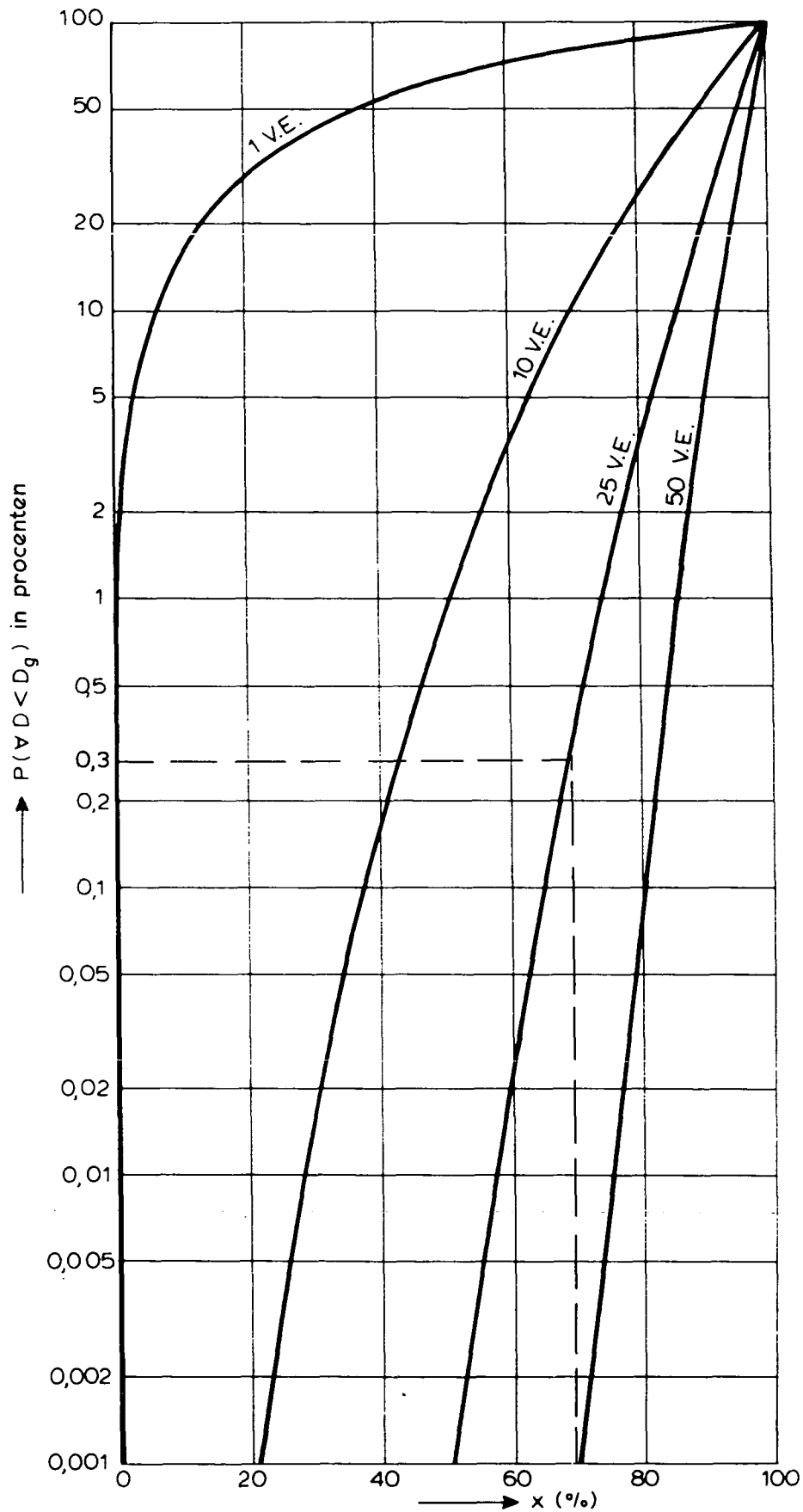
LANCEERMECHANISME



KRITIEKE WATERSNELHEID TEN AANZIEN VAN
UITSPOELING



KRITIEKE WATERSNELHEID ALS FUNKTIE
 VAN KORRELGROOTTE



$D_x = D_g$ 1 V.E. = 1 volume eenheid = $\frac{1}{6} \pi D_g^3$

KANS DAT ALLE KORRELS IN DE BUURT VAN HET
GAT KLEINER DAN DE GATGROOTTE ZIJN

APPENDIX 1

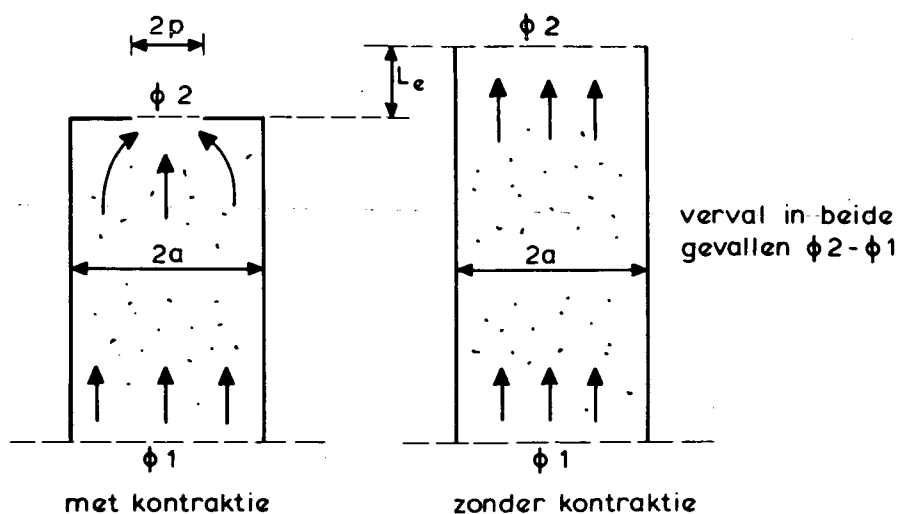
Doorlatendheid van blokken met grote gaten op zand

Voor het berekenen van de doorlatendheid van een zetting met een open oppervlak van minstens 10% op zand zijn de gebruikelijke doorlatendheidsformules niet geschikt [26]. Hieronder wordt voor dergelijke zettingen een nieuwe formule afgeleid. De afleiding blijft beperkt tot een zetting op zand met gaten die eventueel geheel of gedeeltelijk gevuld zijn met hetzelfde zand.

Gezien de lage doorlatendheid van het zand kan verwacht worden dat de stromingsweerstand van de gatwand en de in- en uitstroming verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de aanstroomweerstand en de stromingsweerstand van het zand in het gat.

Achtereenvolgens wordt een formule afgeleid voor het verval door de aanstroomweerstand en het verval over de gatvulling, waarna beide gebruikt worden voor de afleiding van de doorlatendheid van de top laag.

In [39] wordt voor een 2 dimensionaal geval een formule afgeleid voor de equivalente lengte van een kontraktie, gedefinieerd als de extra lengte die een waterdeeltje zou moeten afleggen in een zandpakket zonder vernauwing ten opzichte van een zandpakket met vernauwing, ten einde hetzelfde verval te doorlopen. Dit begrip is in onderstaande figuur verduidelijkt:



De afgeleide formule voor de equivalente lengte L_e luidt:

$$L_e = - \frac{2a}{\pi} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi p}{2a}\right)\right) \quad (1.1)$$

met:

L_e = equivalente lengte van een kontraktie (m)

a = halve breedte van de strip (m)

p = halve breedte van de kontraktie (m)

Aangenomen wordt dat deze formule bij benadering geldig is voor de drie-dimensionale stroming naar een gat als het volgende voor p en a wordt ingevuld:

$$a = \sqrt{(BL)}/2 \quad (1.2)$$

$$p = \sqrt{(A_g)}/2 \quad (1.3)$$

met:

B = Blokbreedte, gatafstand (hart op hart) (m)

L = Bloklengte, gatafstand (hart op hart) (m)

A_g = Gatoppervlak (m²)

Na invullen van formule (1.2) en (1.3) in (1.1) volgt:

$$L_e = - \frac{\sqrt{(BL)}}{\pi} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi\sqrt{A_g}}{2\sqrt{(BL)}}\right)\right) \quad (1.4)$$

Het verval als gevolg van de aanstroomweerstand is als volgt met L_e te bepalen:

$$\phi_A = L_e i = L_e v_t/k \quad (1.5)$$

met:

ϕ_A = Verval als gevolg van aanstroomweerstand (m)

v_t = specifiek debiet door toplaag (filtersnelheid) (m/s)

k = doorlatendheid van zand (m/s)

Met formule (1.4) volgt:

$$\phi_A = - \frac{v_t \sqrt{(BL)}}{\pi k} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi\sqrt{A_g}}{2\sqrt{(BL)}}\right)\right) \quad (1.6)$$

Het verval over het zand in het gat is eenvoudig te bepalen:

$$\phi_v = (D - Y)v_g/k = \frac{BL}{kA_g} v_t (D - Y) \quad (1.7)$$

met:

ϕ_v = Verval over de gatvulling (m)
D = Blokdikte (m)
Y = Gatdiepte (m)
 v_g = Snelheid in het gat (m/s)

Met ϕ_A en ϕ_v is een formule voor de doorlatendheid af te leiden:

$$v_t = k' i_t \Rightarrow \quad (1.8)$$

$$k' = v_f D / (\phi_A + \phi_v) \quad (1.9)$$

met:

k' = Doorlatendheid van de toplaag (m/s)
 i_t = Verhang over de toplaag (-)

Worden de formules (1.6) en (1.7) ingevuld, dan volgt de gewenste doorlatendheidsrelatie:

$$k' = \frac{D k}{L_e + BL (D - Y)/A_g} \quad (1.10)$$

met:

$$L_e = - \frac{\sqrt{(BL)}}{\pi} \ln\left(\sin\left(\frac{\pi\sqrt{A_g}}{2\sqrt{(BL)}}\right)\right) \quad (1.11)$$

APPENDIX II

Aanbevelingen voor verder onderzoek

Aanbevelingen voor verder onderzoek

1. Probleembeschrijving

In het literatuuronderzoek zijn onderzoeksresultaten gevonden die onderling moeilijk te vergelijken zijn en daardoor vragen oproepen die in het vervolgonderzoek opgehelderd zouden moeten worden.

Bij het bestuderen van erosie uit gaten in een vlakke bodem blijkt dat er betrekkelijk weinig uitspoeling optreedt, namelijk tot maximaal een diepte gelijk aan de gatbreedte (Parsons and Apmann [2]). Iets dergelijks wordt ook door Markle [23] op een door golven belast talud gevonden. Zijn talud was verdedigd door cellen die met stortsteen waren gevuld.

Brown beschrijft daarentegen in [19] proeven met een stationaire stroming over een talud, waarbij uitspoeling optreedt, ook al is de gatdiepte veel groter dan de gatbreedte. Hij geeft ook een formule voor begin van uitspoeling, waarmee voor het Armorflex-talud uit [31] een erosie-diepte voorspelt kan worden die aardig in de buurt van de meting komt, ondanks dat de gatvulling bij Armorflex veel grover was dan in [19] was onderzocht. Wordt de proef van Parsons en Apmann met de formule van Brown nagerekend, dan blijkt dat Brown een grotere erosiediepte voorspelt dan is gemeten.

Mogelijke oorzaken zouden kunnen zijn het al of niet aanwezig zijn van een talud en het optredende verhang (zie Derks [22]).

Met betrekking tot de volgende onderwerpen is geen informatie in de literatuur gevonden:

- Ruwheid van een talud met gaten (met uitzondering van Armorflex-blokken).
- Resultaten van modelonderzoek over erosie als gevolg van uitstromend water door een toplaag met zeer kleine gaten.
- Stroomsnelheid in een gat als gevolg van een uitstroming door het gat en stroming over de toplaag.
- Erosie bij een combinatie van uitstromend water en een stroming over het talud.

Uit de buro-studie komt naar voren dat de volgende zaken van belang zijn voor de evenwichtsdiepte:

- geometrie: gatafmetingen en taludhelling
- korrelgrootte van gatvulling
- snelheid op het talud (en snelheidsprofiel)
- snelheid uit de filterlaag door de gaten
- verhang langs het talud

Met het bovenstaande in gedachten is er een onderzoeksprogramma opgezet dat in de volgende twee paragrafen wordt beschreven.

Omdat korrelgrootte en belasting voor oevers en dijken zeer verschillend zijn, is er scheiding gemaakt tussen deze onderwerpen.

Als alternatief op het voorgestelde modelonderzoek van paragraaf 2 en 3, dat een zeer praktijkgericht karakter heeft, wordt ook een fundamentele lijn voor vervolgonderzoek beschreven (paragraaf 4). Tegenover een onmiskenbaar voordeel van het praktijkgerichte modelonderzoek, namelijk dat het resultaat direct op enkele konkrete konstrukties toepasbaar is, staat het voordeel van fundamenteel onderzoek, namelijk dat het resultaat het inzicht vergroot en toepasbaar is op alle denkbare konstrukties van een bepaald type.

In het fundamentele onderzoek wordt stap voor stap van uitwendige belasting (snelheid op enige afstand van de bekleding) via de snelheid vlak boven de bekleding en de snelheid in het gat de maatgevende fysische processen gekwantificeerd. Het resultaat is de schuifspanning op de gatbodem, die samen met de snelheid in het gat bepaalt of uitspoeling zal optreden. De relatie tussen de snelheid vlak boven de bekleding en de snelheid (en schuifspanningen) in een gat, al of niet resulterend in erosie, staat hierbij centraal. Juist die stap wordt bij het praktijkgerichte onderzoek volledig overgeslagen.

2. Praktijkgericht vervolgonderzoek voor oevers

Voorgesteld wordt het vervolgonderzoek met betrekking tot oevers enerzijds te richten op het vaststellen van het snelheidsprofiel vlak boven de toplaag (de ruwheid van taluds met gaten) en anderzijds op de detaillering van de aanname van Parsons and Apmann [2] (de evenwichtsdiepte is ongeveer gelijk aan de gatbreedte) door de evenwichtsdiepte als functie van de snelheid vlak boven het talud te meten.

Het onderzoek naar de snelheid boven het talud (ruwheid) kan aanvangen met het verder uitwerken van de resultaten van het Armorflex-onderzoek in de

stroomgoot. Vervolgens kunnen enkele uiteenlopende konstrukties in een modelopstelling (zie figuur II.1) onderzocht worden, bijvoorbeeld:

- 1a. Armater van Enka, niet gevuld (vergelijkbaar met Geoweb, zie figuur 4 bij hoofdtekst)
- b. Armater, half gevuld met zand
- 2a. Standard Construction block niet gevuld met zand (zie figuur 2 bij hoofdtekst)
- b. Standard Construction block half gevuld met zand
3. Cellular revetment block (zie figuur 3 bij hoofdtekst).

Verwacht wordt dat van proef 1 naar 3 een steeds verder afnemende ruwheid gekonstateerd wordt, terwijl de laatste maar weinig verschilt van de ruwheid van een vlakke beton-plaat.

Tegelijkertijd kan de snelheid bij begin van uitspoeling van het zand in de gaten worden vastgesteld.

Overwogen kan worden om ook de snelheid in de gaten te meten, zodat inzicht verkregen wordt in de grootte van de belasting van de gatbodem. Deze meting is niet essentieel, omdat aangestuurd wordt op het verband tussen het snelheidsprofiel boven de toplaag en de evenwichtsdiepte. Als de tussenstap naar de snelheid in het gat mogelijk is, is echter de interpretatie van de resultaten eenvoudiger.

De lengte van het talud voor het ruwheidsonderzoek moet zodanig zijn dat het verhang in de goot, ter plaatse van het reeds ontwikkelde snelheidsprofiel, goed meetbaar is. Het verhang is een maat voor de ruwheid (zie paragraaf 2.2.1).

Uitgaande van een verwachte gemiddelde snelheid van 0,5 m/s, $k_s = 0,03$ m en een waterdiepte van 0,3 m, leveren de formules een schatting voor het optredende verhang: $i = 6 \cdot 10^{-4}$. Aannemende dat een verval van 6 mm goed meetbaar is, kan hieruit gekonkludeerd worden dat een meetsektie van 10 m lengte voldoende is. Aan het begin van de goot is een instroomsektie nodig met een vergelijkbare ruwheid (orde 10 m lengte). Vlak voor de meetsektie is een gelijke konstruktie als bij de meetsektie noodzakelijk (orde 5 m lengte). Het snelheidsprofiel heeft dan de gelegenheid zich aan te passen.

Per konstruktie-type worden ongeveer 5 verschillende debieten ingesteld, zodat een betrouwbare k_s verkregen kan worden door het gemiddelde te berekenen van

de 5 gevonden waarden van k_s . Zonodig zal worden gekompenseerd voor wandinvloeden.

Voorgesteld wordt om na proef 1a en 2a de gaten voor de helft met zand te vullen. Tijdens proef 1b en 2b kan dan de ruwheid en het begin van erosie gemeten worden. Nadien kan de evenwichtsdiepte bij een bepaalde snelheid bepaald worden. Bij proef 1a en 2a wordt geen erosie gemeten. Bij proef 3 wordt direkt met een erodeerbare bodem gestart.

In de bovenstaande proeven is de meting van erosie 'en passant' meegenomen. Onderstaand worden proeven in een golfgoet voorgesteld die tot doel hebben de evenwichtsdiepte in een reële belastingsituatie te meten. De modelopstelling is in figuur II.2 geschetst.

Het onderzoek richt zich op het verband tussen de snelheid vlak bij het talud en de evenwichtsdiepte.

Aangenomen wordt dat de langs het talud lopende regelmatige golven dezelfde eroderende werking hebben als de retourstroom en haalgolf van langsvarende schepen. Tijdens een golfdal is er sprake van stroming tegen de voortplantingsrichting van de golven in, gekombineerd met een uit het talud stromend debiet (simulatie van retourstroom). Tijdens de golftop is de situatie vergelijkbaar met de haalgolffassage. De snelheid vlak boven het talud kan gemeten worden met een EMF. Dit is een tweedimensionale elektro-magnetische snelheidsmeter volgens het Marsh-McBirney systeem, bestaande uit een platte schijf van 3 cm doorsnede en dikte van ongeveer 4 mm.

In de Pentagoot kan door een geschikte keuze van golfhoogte en periode de gesimuleerde retourstroom onafhankelijk van de scheepssnelheid gevarieerd worden tot maximaal orde 0,6 m/s. De gesimuleerde scheepssnelheid is maximaal 3 m/s.

Steeds wordt na korte tijd golven de diepte van de gaten gemeten. Hierdoor wordt een indruk verkregen van de snelheid van het erosie-proces.

Verwacht wordt dat het snelheidsprofiel bij de golfaanval niet de gelegenheid krijgt zich volledig aan de taludruwheid aan te passen. Daardoor is een korte meetsektie reeds voldoende (orde 5 m).

De konstruktie-typen kunnen hetzelfde zijn als bij het ruwheidsonderzoek, echter de gaten moeten nu volledig gevuld worden met zand of teelaarde, zoals ook in de praktijk het geval is (totaal 6 proeven). De konstruktie die onvoldoende stabiel blijkt te zijn, kan nog eens herhaald worden met een geotextiel onder de blokken (extra proef).

Delen van het boven omschreven onderzoek zullen worden uitgevoerd op prototypeschaal. Een deel is in het kader van het onderzoek H657 "Erosie door open taludbekledingen" uitgevoerd. De verslaglegging ervan is te vinden in bijlage B van verslag H657.

3. Praktijkgericht vervolgonderzoek voor dijken

Voor het onderzoek naar erosie door dijktaluds is het van groot belang niet alleen de snelheid op het talud, maar ook het verhang langs het talud realistisch in een model weer te geven. Dit is het eenvoudigste te bereiken op een talud in een golfgoot.

Voorgesteld wordt om aansluitend op het Deltagoot-onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen het talud te gebruiken om ook enkele proeven te richten op uitspoeling door een open bekleding. Het proevenprogramma moet afgestemd worden op de optredende bezwijkmechanismen:

- uitspoeling door stroming door de toplaag
- uitspoeling door stroming over het talud
- combinatie van beide.

Dit betekent dat, uitgaande van niet gevulde gaten, de gatdiameter-blokdikte verhouding moet variëren van 0,2 à 0,3 tot 0,5 à 1. Daarnaast is het van belang om de korrelgrootte te variëren.

Het volgende proevenprogramma met blokken van 15 cm dik voldoet aan deze eisen:

1. Basalton op grind met korrelgrootte van 10 tot 25 mm.
2. Armorflex op grind met korrelgrootte van 10 tot 25 mm.
3. Rechthoekige blokken met gaten doorsnede 5 cm met korrelgrootte van 10 tot 25 mm.
4. Rechthoekige blokken met gaten doorsnede 5 cm met korrelgrootte van 30 tot 50 mm.
5. Rechthoekige blokken met gaten doorsnede 10 cm met korrelgrootte van 30 tot 50 mm.

Voor de uitvoering van de proeven is het niet noodzakelijk dat het hele talud bestaat uit dezelfde blokken. Van belang is echter dat de verschilddruk over de blokken groot genoeg kan worden.

Op het talud en in een gat wordt de snelheid gemeten met een EMF.

Na enige tijd golven kan de mate van erosie gemeten worden aan de hand van een peiling van de gatdiepte op het talud. Tevens is het nodig om gekleurde filterkorrels toe te passen, zodat na het verwijderen van de toplaag de ondermijning van de blokken bekeken kan worden. Eventueel kan over de meetsectie een grofmazige korf geplaatst worden, zodat de geërodeerde korrels niet naar de teen van het talud verdwijnen.

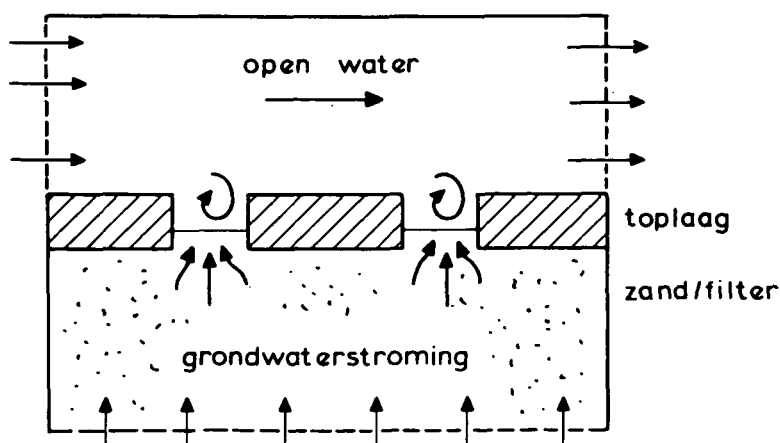
Het onderzoek zal voor 5 konkrete situaties het verband tussen de golfrandvoorwaarden, de snelheid op het talud, de snelheid in het gat en de mate van uitspoeling opleveren.

Deels is het onderzoek inmiddels uitgevoerd. Verwezen wordt naar bijlage C van het verslag H657 "Erosie door open taludbekledingen", waar de resultaten zijn vastgelegd.

4. Fundamenteel vervolgonderzoek

In de vorige paragrafen is voorbijgegaan aan het verband tussen de snelheid vlak boven de blokken en de snelheid op de blokken en de mate van erosie. Hierbij loopt men echter het risico dat de resultaten weliswaar bruikbaar zijn, maar niet begrepen worden, bijvoorbeeld omdat bij twee ogenschijnlijk identieke konstrukties toch een verschillende mate van erosie is gemeten. Meer inzicht wordt verkregen als de snelheid in het gat bepaald wordt. Een methode om deze snelheid voor elk denkbare geometrie en randvoorwaarden te bepalen is middels het computerprogramma ODYSSEE. Dit is een tweedimensionaal stromingsmodel dat lokale snelheid, turbulentie-intensiteit en schuifspanning kan berekenen. Tevens kan met deze informatie het zandtransport worden berekend.

In het rekenprogramma kan niet alleen de waterbeweging in de gaten en daarboven geschematiseerd worden maar ook de grondwaterstroming in het filter of zand eronder:



Voor het geval dat er een verhang loodrecht op de bodem optreedt, in combinatie met een schuifspanning, is er helaas nog geen ervaring met het programma ten aanzien van de betrouwbaarheid van de berekende zandtransporten. Wel kan, aan de hand van de optredende schuifspanning en verhang i_1 , beoordeeld worden of de kritieke schuifspanning, welke is gereduceerd volgens de methode van bijvoorbeeld Martin of Turcotte [38], reeds overschreden wordt.

Deze methode is echter niet meer toepasbaar als het uittredende debiet van dezelfde orde is als de schuifspanningsnelheid, zoals bij dijkbekledingen op een fijn filter kan optreden. Bij dijkbekledingen op een grof filter (D_{f15} orde 10 mm of meer) is het uittredende debiet zo groot, dat de schuifspanning op de bodem niet meer van belang is. Maatgevend is dan de snelheid in het gat, die wel met ODYSSEE te berekenen is. Samen met de berekende u_{gcr} (zie paragraaf 3.2) volgt hieruit of er uitspoeling te verwachten is.

Uit het bovenstaande blijkt dat de resultaten van een ODYSSEE berekening veel gedetailleerdere informatie verschaffen dan een modelproef. Het is echter wel van belang de resultaten van een of meer berekeningen te vergelijken met meetresultaten om zeker te zijn dat de resultaten niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief juist zijn.

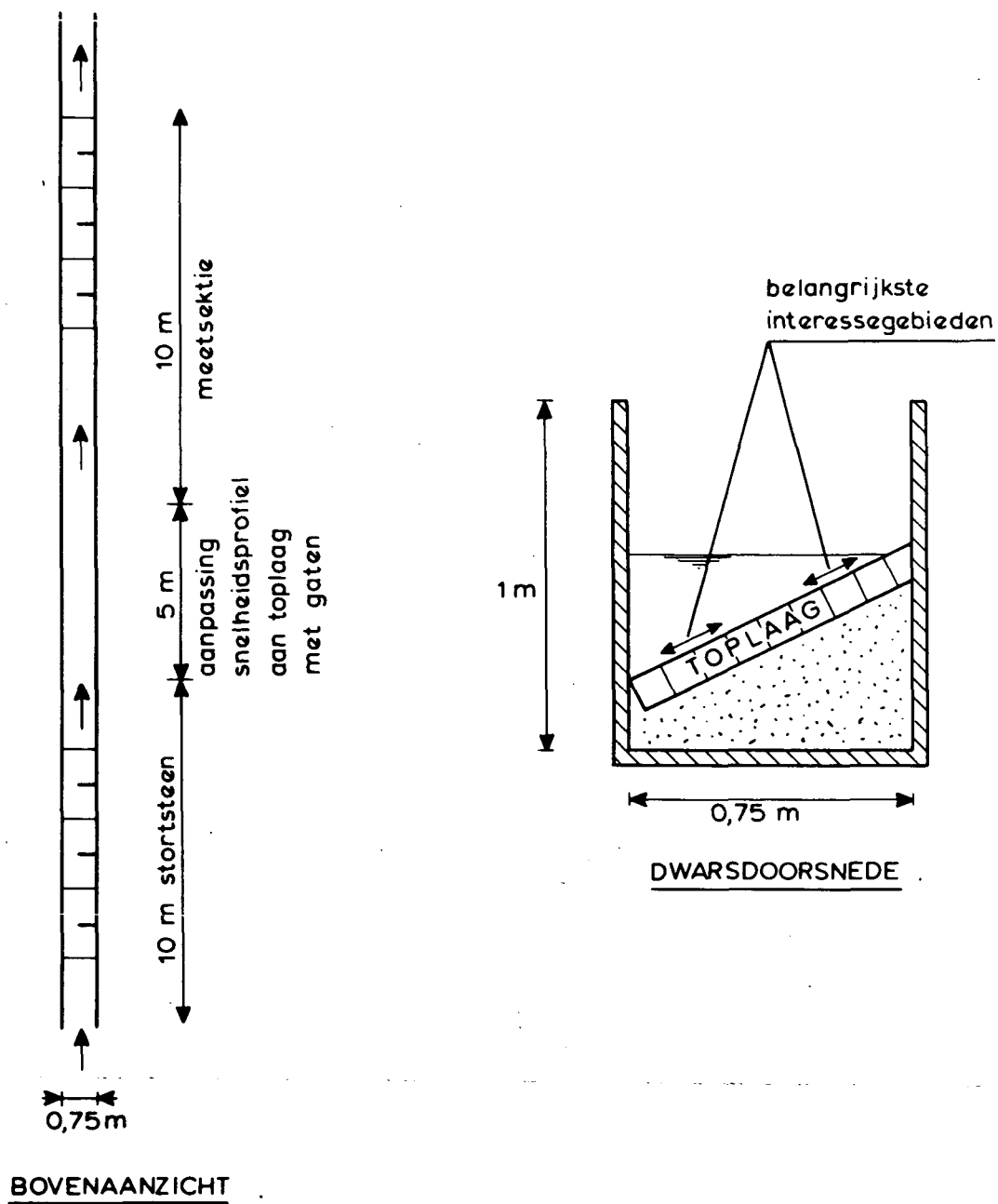
In vergelijking tot het praktijkgerichte onderzoek kan voor de fundamentele lijn de volgende weg bewandeld worden:

| Fundamentele lijn: | Praktijk gericht: |
|--|---|
| 1. proeven in de Tussenpadgoot om de ruwheid te meten en eenvoudig toetsmateriaal ten aanzien van snelheid in gat en erosie te verkrijgen. | 1. Proeven in de Tussenpadgoot ter bepaling van de ruwheid van enkele konstrukties. |
| 2. Proeven narekenen met ODYSSEE ter ijking van het rekenmodel. | 2. Proeven in de Pentagoot (oevers) en de Deltagoot (dijken) ter bepaling van het verband tussen snelheid op toplaag en uitspoeling |
| 3. Reele situaties van haalgolf en retourstroom, gekombineerd met grondwaterstroming, met ODYSSEE | |

| | |
|---|--|
| <p>doorrekenen als voorbereiding op een toetsingsproef in de Pentagoot (oevers) en Deltagoot (dijken).</p> <p>4. Met resultaat van toetsingsproef rekenmodel eventueel aanpassen en enkele konkrete konstrukties doorrekenen.</p> | |
|---|--|

Het resultaat van het onderzoek is een operationeel rekenmodel waarmee, gegeven de ruwheid van de konstruktie, voor elke talubekleding de kritieke hydraulische randvoorwaarde berekend kan worden. De optredende hydraulische randvoorwaarde kan voor oevers met de resultaten van het onderzoek 'Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen (M1115)' bepaald worden. Voor dijken kan dit met de empirische formules van Battjes en Roos.

Inmiddels zijn met het computerprogramma ODYSSEE toetsingsberekeningen uitgevoerd van de door Führböter [1] uitgevoerde proeven. De resultaten van deze berekeningen, die zijn verricht in het kader van WL-speurwerk, zijn beschreven in bijlage E van het verslag H567 "Erosie door open talubekledingen".



MODELOPSTELLING VOOR RUWHEIDSMETING
(TUSSENPADGOOT)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

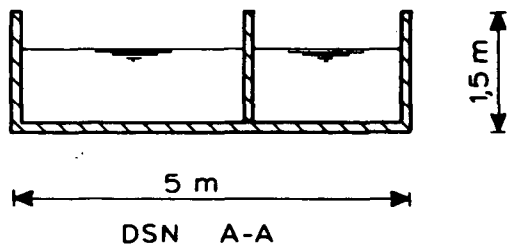
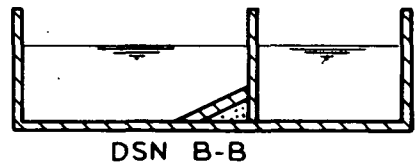
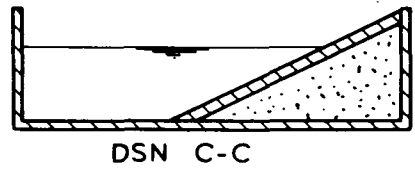
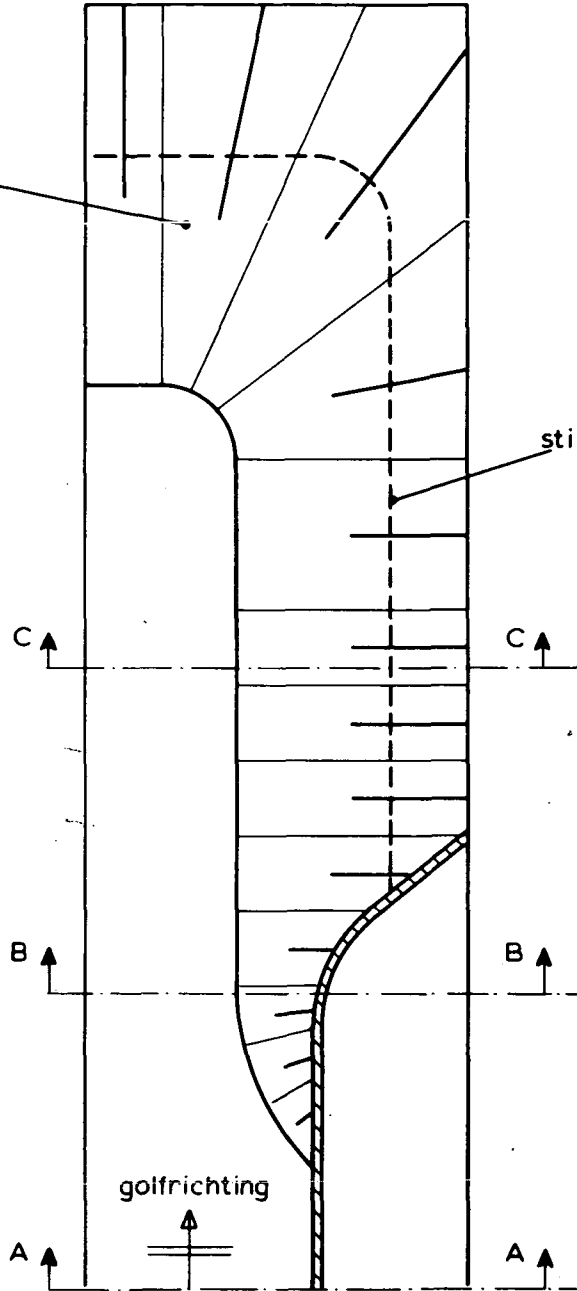
H 657

FIG. II.1

GOLFDEMPEND
TALUD

meetsektie
4 m

stil waterlijn

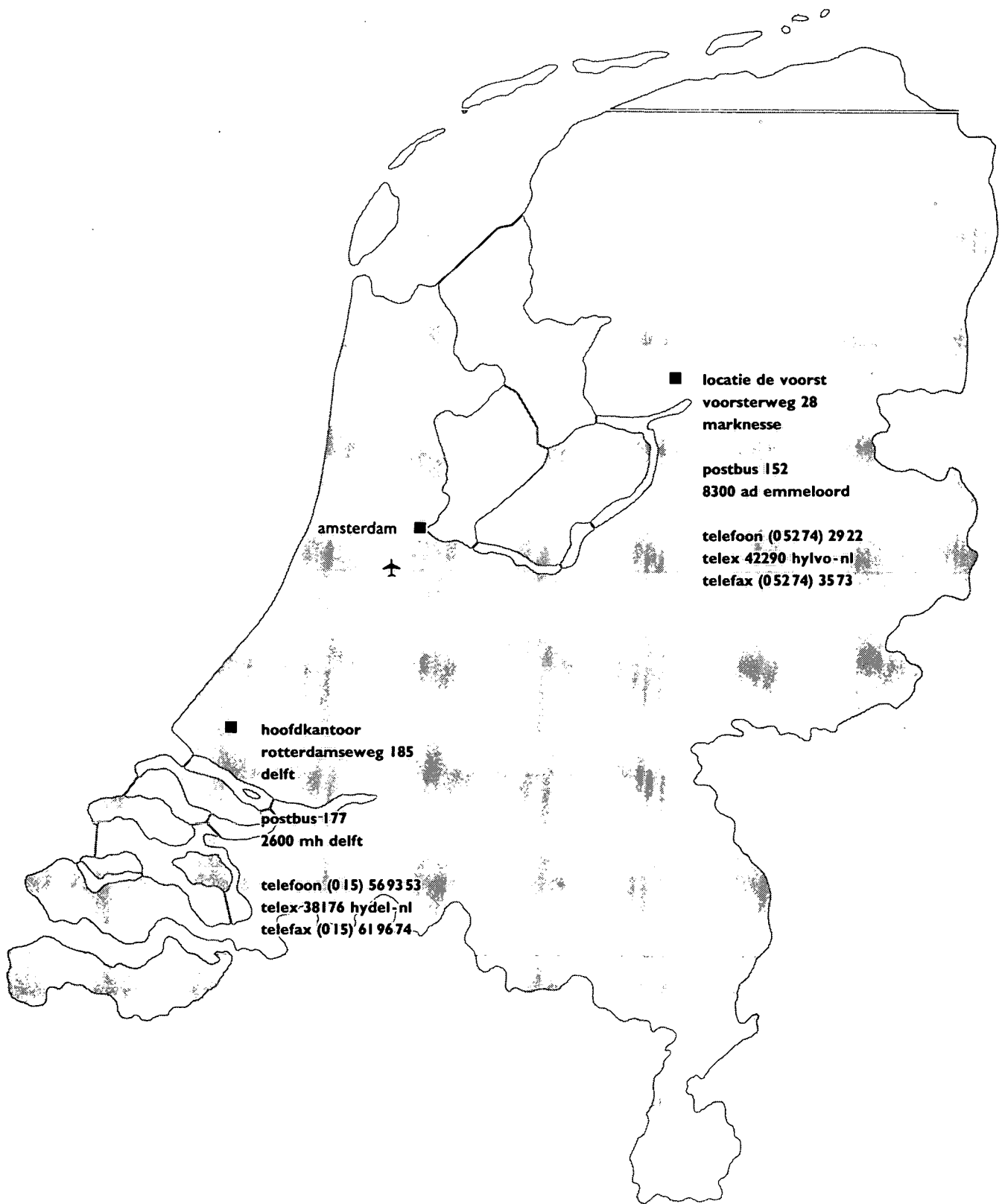


MODELOPSTELLING VOOR EROSIEMETING
PENTAGOOT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. II.2



amsterdam



■ locatie de voorst
voorsterweg 28
marknesse

postbus 152
8300 ad emmeloord

telefoon (05274) 2922
telex 42290 hylvo-nl
telefax (05274) 3573

■ hoofdkantoor
rotterdamseweg 185
delft

postbus-177
2600 mh delft

telefoon (015) 569353
telex-38176 hydel-nl
telefax (015) 619674

**waterloopkundig laboratorium | WL
advisering & research**