

MODELONDERZOEK NAAR DE
SPREIDING EN TALUDOPBOUW
VAN GESTORTE MATERIALEN
IN WATER

December 1986

Technische Universiteit Delft
Vakgroep Waterbouwkunde

Zinkcon bv Papendrecht

I N H O U D

Samenvatting

1. Inleiding en probleemstelling
2. Proeven
 - 2.1. Uitgangspunten voor het model
 - 2.2. Schaalregels
 - 2.3. De proefopstelling
 - 2.4. De stortmaterialen
 - 2.5. Uitvoering van de proeven
 - 2.5.1. Spreiding van het stortmateriaal
 - 2.5.2. Taludopbouw van het stortmateriaal
 - 2.5.3. Overzicht van de uitgevoerde proeven
 - 2.6. Proefresultaten
 - 2.6.1. Spreiding stortmaterialen
 - 2.6.2. Taludopbouw
3. Van model naar prototype
4. Verwaarlozing van randspreiding
5. Conclusies en aanbevelingen

Symbolenlijst
Literatuur
Tabellen
Figuren
Fotobijlage

Samenvatting

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de spreiding en taludopbouw van stortstenen gestort vanaf een steenstorter.

Het onderzoek is uitgevoerd door de Vakgroep Waterbouwkunde van de Technische Hogeschool Delft in samenwerking met Zinkcon bv te Papendrecht.

Bij het onderzoek werd gebruik gemaakt van een schaalmodel.

Als uitgangspunten voor het model zijn genomen:

- de tijdsduur dat de steen onderweg is;
- de waterbeweging rond de stortsteen;
- het stortprofiel kan worden benaderd door een normale verdeling. Als maat voor de spreiding is de standaardafwijking genomen.

De grondmechanische aspecten bij de opbouw van het stortprofiel zijn buiten beschouwing gelaten.

In het model is de spreiding bij verschillende waterdiepten en stortmaterialen bepaald. De gebruikte stortmaterialen zijn: grind, beton, metaal en p.v.c.-granulaat. De waterdiepten in het model variëren tussen de 20 en 90 cm.

De modelproeven leveren geen eenduidig resultaat, de spreiding en taludopbouw blijken sterk afhankelijk van het gebruikte type stortmateriaal. Bij het lichte p.v.c.-granulaat veroorzaakt een laminaire stromingstoestand een afwijkend valgedrag. Doordat de waterbeweging rond de stortsteen in dit geval in het model en prototype fundamenteel verschillen, geven de proeven met het p.v.c.-granulaat een onbetrouwbaar resultaat.

Bij de stortproeven met betonkubussen en ponsdoppen lijkt het valgedrag een dominerende invloed op de spreiding te hebben. Het meest duidelijk komt dat tot uitdrukking bij de betonkubussen; deze gaan na zekere diepte roteren. Op grond hiervan is aangenomen, dat de modelresultaten voor het grind de meest betrouwbare zijn.

Bij het grind neemt de spreiding (uitgedrukt in de standaardafwijking) toe met ongeveer de wortel uit de waterdiepte. De hellingshoek van het talud van het stortprofiel is, naast de waterdiepte, sterk afhankelijk van het aantal gestorte stenen.

1. Inleiding en probleemstelling

De valbaan van een steen gestort vanaf een steenstorter is niet verticaal, maar vertoont slingeringen. Hierdoor komen de stenen met een zekere spreiding op de bodem terecht. Het stortprofiel dat zich op de bodem opbouwt, hangt samen met de spreiding: bij geringe spreiding zal zich snel een steil talud instellen, grote spreiding geeft een flauw talud.

Het aantal benodigde stortstenen voor de opbouw van een gewenst stortprofiel, bijvoorbeeld ter bescherming van pijpleidingen, verandert dus met de spreiding.

In dit onderzoek is gekeken naar de spreiding en taludopbouw van stortstenen bij verschillende waterdiepten en stortmaterialen.

De opbouw van het stortprofiel hangt behalve van de spreiding waarmee de stenen op de bodem aankomen ook samen met grondmechanische aspecten. Deze aspecten zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Het onderzoek is uitgevoerd met behulp van een schaalmodel. De fysische verschijnselen die in het prototype de spreiding van de stenen veroorzaken, dienen in het model op schaal ("gelijkvormig") te worden weergegeven. In dit geval is dit de waterbeweging om de vallende stortsteen. Vervolgens dient de kans op spreiding in model en prototype gelijk te zijn.

2. Proeven

2.1. Uitgangspunten voor het model

Van invloed op de spreiding van het stortmateriaal is de waterdiepte, ofwel de weg die de stortsteen aflegt vanaf de steentorster tot de bodem. Op zijn weg naar de bodem kan de steen, t.g.v. krachten loodrecht op de valrichting, ook horizontaal bewegen. Er ontstaan afwijkingen rond de gemiddelde "koers". Hoe langer de steen onderweg is, des te groter deze afwijkingen zullen zijn.

Indien wordt aangenomen dat:

1. De kans dat de stortsteen naar links of naar rechts afwijkt gelijk is, en
2. de links/rechts keuze onafhankelijk is van de afgelegde weg,

dan zal het stortprofiel een normale verdeling benaderen (benaderen omdat het gestorte profiel begrensd is). Zie figuur 1. Hierbij dient het aantal gestorte stenen enerzijds statistisch voldoende groot te zijn en anderzijds beperkt, omdat na het bereiken van de hoek van inwendige wrijving de stenen zullen gaan afrollen.

In het geval dat een stortsteen met konstante snelheid door een stilstaande vloeistof valt, worden de krachten werkend op de steen beperkt tot de zwaartekracht en de sleepkracht.

Voor deze krachten geldt:

Zwaartekracht $V \cdot (\rho_s - \rho_w) g$ met V = volume stortsteen
 $\rho_s - \rho_w$ = soortelijke massa onder water.

Sleepkracht $C_D \cdot A \cdot \frac{\rho_w \cdot w^2}{2}$ met A = aangestroomd opp.
 $\frac{\rho_w \cdot w^2}{2}$ = stuwdruk, waarin w staat voor de valsnelheid
 C_D = coëfficiënt

Voor een bolvorm geldt: $A = \frac{1}{4} \pi D^2$ en $V = \frac{1}{6} \pi D^3$

Uit het krachtenevenwicht volgt dan voor de valsnelheid:

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g \Delta D}{C_D}}$$

De waarde van de C_D coefficient is voor Re-getallen groter dan ongeveer 1, afhankelijk van de vorm. Deze kan worden gedefinieerd m.b.v. de vormfaktor (S.F.: shape factor):

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

waarbij a, b en c respectievelijk de grootste, middelste en kleinste afmetingen zijn langs drie onderling loodrechte assen. Maar ook zaken als de ruwheid van het steenoppervlak, rotatie van de steen, betreft het een vrije steen of bevindt deze zich te midden van andere, e.d., zijn van invloed op de waarde van de C_D coefficient. In feite komen alle niet te kwantificeren factoren tot uitdrukking in de waarde van de C_D coefficient.

Samenvattend: bij het opzetten van een fysisch model voor onderzoek naar de spreiding van stortstenen is ervan uitgegaan, dat de tijdsduur dat de steen onderweg is, de steenvorm en het Reynoldsgetal, belangrijke parameters zijn. Verder is aangenomen dat het stortprofiel kan worden benaderd met een normale verdeling.

2.2. Schaalregels

Voor de tijdsduur dat een stortsteen onderweg is van de steenstorter naar de bodem, geldt:

$$t = \frac{\text{waterdiepte}}{\text{valsnelheid}} = \frac{h}{w}$$

Deze tijdsduur dient in model en prototype gelijk te zijn:
 $n_t = 1$

$$\text{Ofwel: } n_t = \frac{\left(\frac{h}{w}\right)_{\text{prot.}}}{\left(\frac{h}{w}\right)_{\text{model}}} = \frac{h_{\text{prot.}}}{h_{\text{model}}} \cdot \frac{w_{\text{model}}}{w_{\text{prot.}}} = \frac{n_h}{n_w} = 1$$

Hieruit volgt dus: $n_h = n_w$.

$$\text{Voor de valsnelheid geldt: } w = \sqrt{\frac{4 g \Delta D}{3 C_D}}$$

Dit betekent $n_w = n_{\Delta}^{1/2} n_D^{1/2} n_{C_D}^{-1/2}$, zodat de schaalvoorwaarde wordt:

$$n_h = n_{\Delta}^{1/2} \cdot n_D^{1/2} \cdot n_{C_D}^{-1/2}$$

De waarde van de C_D coefficient in model en prototype is lastig vast te stellen. De coefficient hangt af van de vorm van de stortsteen, het Reynoldsgetal en andere niet te

kwantificeren factoren. Deze laatste invloedsfactoren zullen dus een afwijking tussen model en prototype veroorzaken.

De vorminvloed kan worden beperkt door zoveel mogelijk geometrisch gelijkvormig materiaal te gebruiken.

Voor het Reynoldsgetal geldt dat deze voldoende groot dient te zijn ($Re > \pm 10^3$). De C_D coefficient hangt dan niet langer af van het Reynoldsgetal (zie figuur 2, 3 en 4).

Bij voldoende groot Reynoldsgetal, geometrisch gelijkvormig materiaal en verwaarlozing van de overige invloedsfactoren, geldt dus bij benadering $n_{CD} = 1$.

Dit betekent: $n_h = n_\Delta^{1/2} \cdot n_D^{1/2}$

Deze schaalregel is alleen geldig indien n_h niet te groot wordt gekozen. Bij toename van n_h neemt immers het Reynoldsgetal af en verliest de schaalregel zijn geldigheid.

2.3. Proefopstelling

Voor de uitvoering van de proeven is gebruik gemaakt van een metalen bak van $l \times b \times h = 1,5 \times 1 \times 1$ m, aan beide lange zijden voorzien van een ruit van $0,75 \times 0,40$ m.

Verdere bijzonderheden en benamingen m.b.t. de proefopstelling worden gegeven in fig. 5 en 6.

De variabele parameters zijn: waterdiepte, stortlengte, storthoogte, storthelling, hoeveelheid en type stortmateriaal en het aantal storts op 1 lokatie.

Waterdiepte

De maximaal in het model in te stellen waterdiepte bedraagt 0,90 m.

Stortlengte

De stortlengte L is van invloed op de lengte T van de top van het gestorte profiel

$$\frac{T}{L} < 1, \text{ par. 2.5.1.}$$

De stortlengte dient dus voldoende lang te worden gekozen, opdat het gestorte profiel een twee-dimensionaal karakter bezit en vrij van randstoringen is. Dan kan pas een representatieve dwarsdoorsnede worden opgetekend. Anderzijds dient de stortlengte uit praktisch oogpunt (hoeveelheid beschikbaar stortmateriaal, en het verwijderen van het gestorte materiaal) zo kort mogelijk te worden gehouden.

Voor de meeste materialen is tijdens de proeven een stortlengte van 15 cm aangehouden. Bij een korreldiameter van 5 mm komt dit overeen met een lengte van 30 maal de diameter. Vertaald naar het prototype betekent dit, bij een stortsteen van 30 cm een stortlengte van $30 \times 0,30 = 9$ m.

Stortheogte

Voor de stortheogte is ca. 3 cm aangehouden. Deze hogte komt voor het grind (kif) overeen met $30/3 = 6$ maal de diameter, in prototype waarden: $6 \times 0,3 = 1,8$ m, dit komt overeen met de gebruikelijke praktijksituaties. Ook voor de andere materialen is een stortheogte van 3 cm aangehouden.

Stortheelling

De stortheelling is zodanig gekozen dat het materiaal zeer geleidelijk wordt gestort. Dit i.v.m. de ongunstige invloed van een te groot stortdebiet op de spreiding (zie par. 2.6.1.) en aansluitend bij de praktijk.

De betonkubussen zijn met de hand, kubus voor kubus, gestort. Hiermee wordt voorkomen dat de kubussen roterend in het water komen, hetgeen wel het geval is, indien ze over de rand van de stortheelling kantelen. Rotatie van de kubussen beïnvloedt de spreiding zeer sterk. Dit aspect komt in par. 2.6.1. nader aan de orde.

Hoeveelheid stortmateriaal

Voor het grind met een zeefdiameter tussen de 4 en 6 mm is uitgegaan van een scheepslading van 400 ton en een stortlengte van 40 m. Bij stortstenen van gemiddeld 40 kg betekent dit:

$$\frac{400.000}{40 \times 40} = 250 \text{ stenen/m}^3$$

Een stortlengte van 9 m bevat dus ca. 2.250 stenen. In het model is uitgegaan van 3.000 grindkorrels. Bij de overige materialen is uitgegaan van een zodanig aantal dat de proef statistisch betrouwbaar is.

Aantal stort op 1 lokatie

Het stortprofiel is meestal in enkele stort opgebouwd om bestudering van de wijze waarop het talud zich instelt mogelijk te maken.

2.4. Stortmaterialen

Voor de proeven is gebruik gemaakt van een viertal verschillende materialen: grind, beton, metaal en p.v.c.-granulaat (zie bijgevoegd fotomateriaal achterin dit rapport). De materialen kunnen worden onderscheiden naar soortelijk gewicht, diameter en vorm. Deze drie aspecten komen samen in de formule voor de valsnelheid:

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g \Delta D}{C_D}}$$

waarbij in C_D meer dan alleen de vormfaktor is verdisconteerd.

In tabel 1A is een overzicht gegeven van de verschillende materiaalparameters. Hierbij kan het volgende worden opgemerkt:

- Onder de nominale diameter D_N wordt verstaan de diameter van een bol met hetzelfde volume als de beschouwde stortsteen. Deze diameter is aan de hand van een steekproef bepaald:

$$\frac{1}{6} \pi D_N^3 \rho = \frac{G}{n}$$

n = aantal korrels
 G = totale gewicht van de korrels

Hieruit volgt:

$$D_N = \sqrt[3]{\frac{6G}{\pi \rho n}}$$

- de valsnelheid is eveneens middels een steekproef bepaald. Voor ca. 50 deeltjes is een valtijd voor een waterdiepte van 0,89 m bij een storthoogte van 3 cm gemeten (uitgezonderd de betonkubussen, deze zijn vanaf het wateroppervlak losgelaten).
- De vorm van het stortmateriaal is uit te drukken in een vormfactor S.F. (S.F. staat voor "shape-factor"):

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$
 waarbij a, b en c resp. de grootste, middelste en kleinste afmetingen zijn langs drie onderling loodrechte assen.
- De C_D factor is een functie van (zie par. 2.1):
 - het Re-getal: bij turbulente stroming wordt in het algemeen verondersteld dat het Re-getal geen invloed heeft op de C_D waarde
 - de vorm van de stortsteen
 - overige invloedsfactoren als genoemd in par. 2.1. Hiervan is de invloed moeilijk vast te stellen en worden buiten beschouwing gelaten. Bij turbulente stroming geldt dan: $C_D = f(S.F.)$
 In fig. 2, 3 en 4 staat het verband tussen de vorm en de C_D waarde gegeven. De C_D waarde kan ook uit de gemiddelde valsnelheid worden berekend:

$$C_D = \frac{4 g \Delta D}{3 \bar{w}^2}$$

2.5. Uitvoering van de proeven

2.5.1. De spreiding

In fig. 7 zijn voor het gestorte profiel de verschillende te onderscheiden gebieden aangegeven. Van belang is de invloed van de randen, deze dient beperkt te zijn.

Een belangrijke coëfficiënt is T/L, de verhouding tussen de toplengte en de stortlengte, een maat voor de randinvloed. Bij elke proef is gecontroleerd of deze verhouding voldoende groot is.

De dwarsdoorsnede over het gestorte profiel wordt verondersteld Gausisch te zijn, d.w.z. de spreiding van de stortstenen bezit een normale verdeling (zie par. 2.1).

Als maat voor de spreiding wordt de standaardafwijking σ genomen. Deze wordt als volgt bepaald:

Uit de geregistreeerde dwarsdoorsnede van het gestorte profiel wordt de oppervlakteverdeling berekend. Er wordt aangenomen dat de oppervlakteverhouding gelijk is aan de verhouding in aantallen stortstenen. M.b.v. aparte proeven is voor elk stortmateriaal voor ongestapelde aaneengesloten stortstenen een correctiefactor bepaald (bij stapeling neemt het aantal stenen per oppervlakte eenheid immers toe). Het aantal los verspreide stenen wordt geteld. Op deze wijze kan een cumulatieve frequentieverdeling voor de gestorte stenen worden bepaald.

De standaardafwijking wordt vervolgens berekend uit:

$$\sigma = \frac{X_{0,84} - X_{0,16}}{2}, \text{ waarbij } X_{0,84} \text{ en } X_{0,16} \text{ de waarden zijn,}$$

waartussen $84-16 = 68\%$ van de waarnemingen ligt. E.e.a. is verduidelijkt in fig. 8.

2.5.2. Taludopbouw

De taludopbouw is uitgedrukt in de hellingshoek ϕ van het talud, dan wel de tan of cotan van deze hoek. De hellingshoek wordt bepaald door, zowel links als rechts van de top van het gestorte profiel, het verschil in hoogte tussen twee meetpunten te delen door de afstand. De links en rechts van de top gevonden waarden worden gemiddeld, zie fig. 9. De hellingshoek is dus een gemiddelde waarde en zegt derhalve niets over de vorm van het talud.

2.5.3. Overzicht uitgevoerde proeven.

In tabel 1B is een overzicht gegeven van de voornaamste proeven.

2.6. Proefresultaten

2.6.1. Spreiding

De resultaten m.b.t. de spreiding zijn gegeven in tabel 2 en fig. 10. De resultaten van de spreidingsproeven met de betonkubussen worden i.v.m. een sterk afwijkende valgedrag, hierna apart besproken.

Om de waarden van de spreiding voor de verschillende materialen vergelijkbaar te maken is deze gedeeld door de nominale diameter. In tabel 3 is deze dimensieloze parameter σ/D_N gegeven. Zo ook is de waterdiepte vertaald naar de dimensieloze parameter $h/\Delta D$ (tabel 4).

In fig. 11, 12 en 13 is voor elk van de gebruikte materialen de spreiding als functie van $h/\Delta D$ (op lineaire en log-schaal) gegeven. Doordat ΔD voor elk materiaal konstant is, kan in feite de spreiding als functie van de waterdiepte worden gelezen. Uit de figuur blijkt dat bij toename van ΔD de spreiding sterker toeneemt met de waterdiepte. Dit ondanks het feit dat de valsnelheid toeneemt, waardoor het deeltje sneller op de bodem aankomt en minder tijd heeft van zijn verticale baan af te wijken. Op dit resultaat wordt nader ingegaan.

Tussen de spreiding σ/D en de parameter $h/\Delta D$ wordt het volgende algemene verband aangenomen:

$$\frac{\sigma}{D} = C \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^\alpha \text{ waarbij } C \text{ en } \alpha \text{ konstanten zijn}$$

$$\text{Er geldt nu: } \log \left(\frac{\sigma}{D} \right) = \log \left\{ C \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^\alpha \right\}$$

$$\text{ofwel: } \log \left(\frac{\sigma}{D} \right) = \alpha \log \left(\frac{h}{\Delta D} \right) + \log C$$

In fig. 13 is $\log \left(\frac{\sigma}{D} \right)$ uitgezet tegen $\log \left(\frac{h}{\Delta D} \right)$

Uitgaande van het lineaire verband:

$$y = \alpha t + \beta \quad \text{met} \quad \begin{aligned} y &= \log \left(\frac{\sigma}{D} \right) \\ t &= \log \left(\frac{h}{\Delta D} \right) \\ \beta &= \log C \text{ zodat } C = 10^\beta \end{aligned}$$

zijn m.b.v. de kleinste kwadratenmethode de waarden van de coëfficiënten α en β bepaald. De resultaten staan gegeven in tabel 5.

De coëfficiënt α is een maat voor de spreidingstoename bij vergroting van de waterdiepte. Zoals al eerder is aangegeven, neemt α toe bij toename van ΔD .

Dit kan verschillende oorzaken hebben:

1. Verandering van Δ en/of D betekent verandering van het Reynoldsgetal. Voor het p.v.c.-granulaat wordt het Reynoldsgetal zo klein (ca. 400), dat de deeltjes in laminaire stroming naar de bodem bewegen.

De Re-getallen voor het grind en de ponsdoppen duiden op een turbulente stromingstoestand, zodat de waarden van de C_D coëfficiënten onafhankelijk zijn van het Re-getal (zie ook fig. 3). De afwijking van de spreiding heeft dus een andere oorzaak.

2. Behalve dat Δ en/of D verandert, wijzigt ook de vorm en hiermee de waarde van de C_D coefficient. De in par. 2.4 gevonden waarden voor S.F. en C_D zijn (de twee C_D waarden uit tabel 1A zijn gemiddeld):

kif	S.F. = 0,7 à 1	$C_D = 1,3$
gebroken grind	S.F. = 0,5	$C_D = 1,9$
grind	S.F. = 0,7	$C_D = 1,6$
p.v.c. granulaat	—	$C_D = 1,8$
ponsdoppen	—	$C_D = 1,8$

Opvallend is dat de C_D waarde voor de ponsdoppen niet sterk verschilt met het grind, terwijl dit voor het spreidingsverloop juist wel geldt. Dit wijst op een andere oorzaak:

3. De verandering in spreidingstoename met de waterdiepte treedt vooral op bij het gebruik van ander stortmateriaal. Bij het grind zijn de verschillen in de waarden voor de coefficient α zo klein, dat deze niet significant kunnen worden genoemd. Dit duidt erop, dat mogelijk niet het toenemen van de ΔD waarde, maar het valgedrag van de ponsdoppen (net als bij de betonkubussen) de hoofdoorzaak is van de sterkere spreidingstoename bij vergroting van de waterdiepte.

Het valgedrag is niet meegenomen in het onderzoek, zodat hier niet dieper op kan worden ingegaan.

In fig. 14 en 15 is nogmaals het verband tussen σ/D resp. $\log(\sigma/D)$ en $\log(h/\Delta D)$ gegeven, nu bij konstante waterdiepten. Uit deze figuren komt duidelijk naar voren dat een geringere spreidingstoename bij vergroting van de waterdiepte, ook betekent dat het verschil in spreiding tussen de waterdiepten kleiner wordt. De spreiding lijkt bij toenemende $(h/\Delta D)$ uiteindelijk in 1 punt samen te komen. De mogelijke oorzaak is hierboven al aangegeven onder punt 1: toename van $h/\Delta D$ bij constante waterdiepte betekent afname van ΔD , hetgeen betekent dat het stortmateriaal zich uiteindelijk op laminaire i.p.v. turbulente wijze door het water beweegt, waardoor de spreiding afneemt.

Een vraag welke rijst bij bestudering van fig. 11 t/m 13 is: wat is de boven- en ondergrens voor de spreiding. Het lijkt aannemelijk te veronderstellen dat na een zekere diepte de spreiding niet langer toeneemt (de bovengrens van de spreiding), en omgekeerd, dat de spreiding konstant zal blijven bij verdere afname van waterdiepte (de ondergrens). In verschillende figuren komt deze tendens tot uiting.

Spreidingsproeven met de betonkubussen

De betonkubussen vertonen een sterk afwijkend spreidingsgedrag. Dit wordt veroorzaakt door rotatie van de kubus. Deze rotatie vangt pas aan na zekere diepte; bij rotatie linksom verplaatst de kubus zich naar rechts en omgekeerd. In fig. 16 is dit proces en de consequenties voor de spreiding geschematiseerd weergegeven.

Storten met groot stortdebiet

Het storten van grote hoeveelheden materiaal in een korte tijd geeft een afwijkend spreidingsgedrag te zien, doordat het stortmateriaal zich als "dichtheidsstroom" gaat gedragen. In fig. 17 is het resultaat van een spreidingsproef uitgevoerd met groot stortdebiet gegeven. De ervaringen met zandklappen bij de sluiting van het Brouwershavense Gat en in het cunet van de Stormvloedkering zijn soortgelijk.

Een ander in het model waarneembaar effect is het "wegblazen" van reeds gestort materiaal, indien een grote hoeveelheid materiaal op al aanwezig materiaal wordt gestort, fig. 18.

Het verschijnsel is in het model vooral waarneembaar bij de lichte p.v.c.-korrels. Waarschijnlijk zal dit aspect dan ook een kleinere rol spelen bij zwaarder stortmateriaal. Bij modelproeven echter kan dit verschijnsel de spreiding beïnvloeden.

Om bovenstaande redenen is het stortdebiet laag gehouden.

2.6.2. Taludopbouw

Indien de spreiding σ verandert, zal ook de taludopbouw veranderen; de taludopbouw, uitgedrukt in de hellingshoek ϕ is afhankelijk van dezelfde parameters als waarvan de spreiding een functie is.

In tegenstelling tot de spreiding is de hellingshoek ook afhankelijk van het aantal gestorte stenen.

Indien 2 stortingen (stort A en stort B) in beschouwing worden genomen, waarbij

$$N_{\text{stort B}} = r \cdot N_{\text{stort A}} \text{ met } N = \text{aantal gestorte stenen} \\ r = \text{constante}$$

dan geldt voor de gemiddelde hellingshoeken (zie fig. 9)

$$\tan \phi_A = \frac{p_A - q_A}{x_p - x_q}$$

Met p_A, q_A : hoogte stortprofiel A op de plaats x_p resp. x_q
A : hellingshoek stortprofiel

$$\text{en } \tan B = \frac{p_B - q_B}{x_p - x_q}$$

Indien beide stortingen, op de hoeveelheid stortsteen na, verder identiek zijn, is de kans dat een steen op een bepaalde plaats in het talud komt dezelfde, zodat:

$$p_B = r \cdot p_A \\ q_B = r \cdot q_A$$

$$\text{Dit betekent: } \tan \phi_B = \frac{r \cdot p_A - r \cdot q_A}{x_p - x_q} = r \cdot \tan \phi_A$$

De verandering van de tan uit de hellingshoek is recht evenredig met de verandering van het aantal stortstenen. Bovenstaande geldt, mits er aan twee voorwaarden wordt voldaan:

1. De hoeveelheid stortmateriaal dient voldoende groot te zijn, omdat er zich anders geen profiel opbouwt.
2. Het talud dient nog niet de maximale hellingshoek te hebben bereikt (d.i. de hoek voordat het talud of delen daarvan bezwijken resp. voordat stenen gaan afrollen).

Verder geldt:

$$\frac{1}{\tan \phi_B} = \frac{1}{r} \frac{1}{\tan \phi_A}$$

$$\text{ofwel } \cotan \phi_B = \frac{1}{r} \cotan \phi_A$$

Voor het kif zijn voor verschillende waterdiepten een aantal opeenvolgende stortst uitgeoerd. Elke stort bevat 1.500 stenen. De resultaten staan in tabel 6 en de figuren 19 en 20.

Voor het kif blijkt de maximale hellingshoek ca. 34° te bedragen (1:1,5). Dit is minder dan de maximale inwendige wrijvingshoek, deze ligt rond de 37 a 38°. Verder wordt voor een waterdiepte van 90 cm de grenshoek bereikt na het storten van 8 maal 1.500 stenen. Bij een waterdiepte van 30 cm na ca. 5 a 6 storten.

Vertaald naar prototype waarden komt een scheepslading overeen met ca. 2 stortst; voor een waterdiepte van 90 en 30 cm bedragen de hellingshoeken dan ongeveer 1:5 resp. 1:3.

De horizontale afstand tussen de 2 krommen in figuur 21 behorende bij verschillende waterdiepten geeft de extra te storten hoeveelheid materiaal die bij grotere diepte dezelfde hellingshoek oplevert. Deze extra hoeveelheid blijft voor de verschillende gevonden hellingshoeken bij benadering constant.

In fig. 22 is voor het kif $\cotan \phi$ als functie van $h/\Delta D$ gegeven (hierbij is voor de stortingen met 1.500 resp. 3.000 stenen gebruik gemaakt van de resultaten vermeld in tabel 6).

In tabel 7, 8 en 9 is een overzicht gegeven van de resultaten m.b.t. de hellingshoeken. Behalve bij de ponsdoppen is telkens met twee verschillende hoeveelheden materiaal gestort. Voor het kif zijn de resultaten van de stortingen met meer dan 3.000 stenen niet in de tabel opgenomen.

In fig. 23 is voor de verschillende materialen $\cotan \phi$ uitgezet tegen $h/\Delta D$. Hierbij dienen de volgende opmerkingen te worden gemaakt:

1. De resultaten voor het grind, 8-11 mm, vertonen voor $N = 1.500$ een grote spreiding. Een verklaring hiervoor ontbreekt nog. Ook bij het p.v.c. vertonen de resultaten grote spreiding (voor $N = 6.000$). Een mogelijke oorzaak is de verstoring van het stortprofiel door het "wegblazen" van deeltjes (zie par. 2.1.). Dit effect is in ieder geval waargenomen bij $h = 0,50$ m.
2. De ponsdoppen vertonen een afwijkend gedrag in vergelijking met de andere materialen ($\cotan \phi$ is bij benadering constant). Een mogelijke oorzaak is de opbouw van het talud van het gestorte profiel. In vergelijking tot de andere materialen vertoont het talud lokaal sterk verschillende hellingshoeken, waardoor de bepaling van de gemiddelde hellingshoek zeer onnauwkeurig is. In fig. 24 zijn de verschillende stortprofielen gegeven.
3. Het aantal uitgevoerde stortingen is te beperkt voor een betrouwbare vergelijking van de verschillende materialen.

3. Van model naar prototype

Met behulp van modelproeven is een verband afgeleid tussen de spreiding en de waterdiepte:

$$\frac{\sigma}{D} = C \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^\alpha \quad (1)$$

waarbij Δ , D , C en α constanten zijn, afhankelijk van het gebruikte stortmateriaal. Deze formule kan naar het prototype worden vertaald:

$$\sigma_p = \left(\frac{\sigma}{D} \right)_M \times D_p \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{\sigma}{D} \right)_M = \left(\frac{\sigma}{D} \right)_p \quad (2)$$

$$h_M = \frac{h_p}{n_h} \quad (3)$$

Worden (2) en (3) ingevuld in (1), dan levert dit:

$$\sigma_p = D_p \cdot C \cdot \left(\frac{h_p}{n_h (\Delta D)_M} \right)^\alpha$$

ofwel:

$$\sigma_p = \frac{D_p \cdot C}{\{n_h (\Delta D)_M\}^\alpha} \cdot h_p^\alpha = C_p \cdot h_p^\alpha$$

waarbij $n_h = n_D^{1/2} n_\Delta^{1/2} n_{CD}^{-1/2}$ (schaalregel uit par. 2.2)

Voor het stortmateriaal in het prototype wordt aangenomen:

Gewicht stenen 30-60 kg. Dit betekent een gemiddeld gewicht van 45 kg, zodat D_N ongeveer bedraagt:

$$D_N = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 45}{\pi \rho}} \approx 0,32 \text{ m} \quad (\rho_s = 2.650 \text{ kg})$$

Voor $\rho_s = 2.650 \text{ kg}$ geldt: $\Delta = 1,65$.

Uit de proefresultaten van de verschillende stortmaterialen kan nu een formule geldig voor het prototype worden opgesteld. De resultaten staan in tabel 10.

Bij het opstellen van de formule is voor alle materialen n_{CD} gelijk 1 genomen. Dit is gedaan omdat n_{CD} ongelijk 1 suggereert dat de verschillende C_D waarden nauwkeurig kunnen worden vastgesteld, hetgeen niet het geval is.

De formules hebben een beperkt geldigheidsgebied, te weten de minimum en maximum waterdiepten uit het model vertaald naar prototype waterdiepten. De spreiding buiten het geldigheidsgebied wordt

verkregen door extrapolatie. Dit kan bij kleine en grote waterdiepten leiden tot onder- respectievelijk overschatting, omdat de spreiding naar grenswaarden tendeert.

De proefresultaten voor het p.v.c.-granulaat zijn niet gebruikt i.v.m. de lage Reynoldsgetallen.

Zoals uit fig. 25 blijkt, verschilt het verloop in spreiding als functie van de waterdiepte volgens de proefresultaten van de ponsdoppen sterk met die van het grind. Het verloop volgens de ponsdoppen doet onbetrouwbaar aan. Het steile verloop wordt veroorzaakt doordat de coëfficiënt α groter dan 1 is. De mogelijke oorzaak voor het onbetrouwbare verloop is genoemd in par. 2.6.1.

4. Verwaarlozing van randspreiding

4.1. Inleiding

In deze paragraaf worden de proefresultaten uitgewerkt zonder de randspreiding te verwerken. Met randspreiding wordt dat gebied van de bestorting bedoeld, waar geen gesloten dek van stenen aanwezig is (zie ook fotobijlage en fig. 7). Het blijkt dat de op deze manier bewerkte proefresultaten beter aansluiten bij de ervaringen in de praktijk.

4.2. Spreiding van de stortmaterialen als functie van de waterdiepte

De spreidingswaarden staan in tabel 11.

Opmerkingen:

1. De stort met tweemaal zoveel stortmateriaal levert voor alle materialen een grotere spreiding. Dit is niet correct.
2. Bij de ponsdoppen (en betonkubussen) ontstaat door het niet meenemen van de randspreiding een zeer vertekend beeld.
3. Gezien het feit dat de resultaten voor het grind als de meest betrouwbare worden aangenomen, zijn in tabel 11 voor de overige stortmaterialen alleen de waarden vermeld welke eenvoudig zijn te herleiden. Hierdoor ontbreken de spreidingswaarden voor de betonkubussen en voor het p.v.c.-granulaat bij de waterdiepten 0,3 en 0,5 m.

Alleen voor het grind worden de proefresultaten zonder randspreiding verder uitgewerkt.

4.3. Uitwerking proefresultaten

Tussen de spreiding σ/D en de parameter $h/\Delta D$ wordt het algemene verband aangenomen:

$$\frac{\sigma}{D} = C \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^\alpha \text{ ofwel}$$

$$\log \left(\frac{\sigma}{D} \right) = \alpha \log \left(\frac{h}{\Delta D} \right) + \log C$$

M.b.v. de kleinste kwadratenmethode worden de waarden van de coëfficiënten α en β ($= \log C$) bepaald.

Resultaat:

$$\text{Kif, 4-6 mm} \quad \frac{\sigma}{D} = 2,07 \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^{0,29}$$

$$\text{Gebroken grind, 4-6 mm} \quad \frac{\sigma}{D} = 1,55 \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^{0,34}$$

$$\text{Grind, 8-11 mm} \quad \frac{\sigma}{D} = 2,64 \left(\frac{h}{\Delta D} \right)^{0,18}$$

4.4. Vertaald naar prototype

$$\text{kif} \quad C_p = 1,46 \quad \longrightarrow \quad \sigma = 1,46 h^{0,29}$$

$$\text{gebroken grind} \quad C_p = 1,27 \quad \longrightarrow \quad \sigma = 1,27 h^{0,34}$$

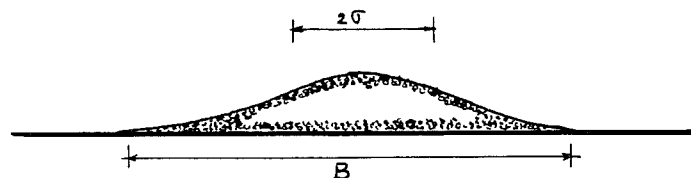
$$\text{grind} \quad C_p = 1,30 \quad \longrightarrow \quad \sigma = 1,30 h^{0,18}$$

h (m)	$\sigma_p(m)$		
	<u>kif</u>	<u>gebr. grind</u>	<u>grind</u>
1	1,46	1,27	1,30
2	1,79	1,61	1,47
3	2,01	1,85	1,58
4	2,18	2,03	1,67
5	2,33	2,20	1,74
7,5	2,62	2,52	1,57
10	2,85	2,78	1,97
12,5	3,04	3,00	2,05
15	3,20	3,19	2,12

De formules zijn ook uitgezet in figuur 26.

4.5. Verband tussen de spreiding σ en breedte B van het stortprofiel

Er blijkt een konstant verband tussen de breedte B en de spreiding σ van het gestorte profiel te bestaan.



Het verband voor de verschillende grindsoorten (zie tabel 12) bedraagt:

$$\begin{aligned} \text{kif} & \quad B = 4,37 \sigma \approx 4,4 \sigma \\ \text{gebroken grind} & \quad B = 4,3 \sigma \\ \text{grind, 8-11 mm} & \quad B = 4,3 \sigma \end{aligned}$$

Voor het grind geldt dus $B \approx 4,3 \sigma$

M.b.v. dit verband kan de formule voor de spreiding worden omgezet in een formule voor de stortbreedte:

	<u>met randspreiding</u>	<u>zonder randspreiding</u>
Kif	$B = 6,1 h^{0,44}$	$B = 6,4 h^{0,29}$
Gebr. grind	$B = 5,2 h^{0,51}$	$B = 5,5 h^{0,34}$
Grind 8-11 mm	$B = 4,8 h^{0,51}$	$B = 5,7 h^{0,18}$

(de formules zijn vertaald naar prototype).

De formules leveren voor een aantal waterdiepten:

$h[m]$	B^*		
	<u>kif</u>	<u>gebr. grind</u>	<u>grind</u>
1	6,40	5,50	5,70
3	8,70	8,00	6,90
5	10,1	9,5	7,5
7,5	11,4	10,9	8,1
10	12,4	12,0	8,6
12,5	13,2	13,0	8,9
15	13,9	13,8	9,2

* zonder randspreiding

De formules zijn uitgezet in figuur 27 en 28.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1. Conclusies

- 5.1.1. Voor het grind en het p.v.c.-granulaat lijkt de aanname dat het gestorte profiel een normale verdeling benadert, redelijk te voldoen.

Het valgedrag van de betonkubussen wordt na een bepaalde diepte (in het model ca. 30 cm) gekenmerkt door rotatie. De rotatie van de kubussen veroorzaakt een sterk afwijkend spreidingsgedrag. Hierdoor benadert het stortprofiel geen normale verdeling.

Ook bij de ponsdoppen lijkt de aanname van een normale verdeling minder geschikt. Een sterk afwijkend spreidingsgedrag als bij de betonkubussen is echter niet waargenomen.

Uit bovenstaande kan worden geconcludeerd:

- a) Het valgedrag van het stortmateriaal is van grote invloed op de vorm van het stortprofiel en de spreiding.
- b) Voor dit onderzoek lijken de resultaten voor het grind de meest betrouwbare.

- 5.1.2. Bij een groot stortdebiet gedraagt het stortmateriaal zich als "dichtheidsstroom", waardoor een afwijkend spreidingsgedrag ontstaat.

- 5.1.3. De verandering van de tan uit de hellingshoek van het gestorte profiel is rechtevenredig met de verandering van het aantal stortstenen.

- 5.1.4. De gevonden maximale hellingshoek van het talud van het gestorte profiel is kleiner dan de maximale inwendige wrijvingshoek.

- 5.1.5. Indien als "spreiding" dat gebied aangenomen wordt waar de bestorting een aaneengesloten laag van tenminste een laag dik is, sluiten de proefresultaten beter aan bij de praktijkervaringen.

5.2. Aanbevelingen

- 5.2.1. Onderzoek naar de invloed van de parameters (soortelijk gewicht), D (diameter), S.F.-faktor (vorm) en eventueel andere parameters op de spreiding. Hierbij dient het stortmateriaal zodanig te worden samengesteld, dat telkens 1 van de parameters verandert.

- 5.2.2. Onderzoek naar het valgedrag (roteren, glijden, spiralende beweging etc.) bijvoorbeeld door het filmen van stortmateriaal tijdens de val.

- 5.2.3. Aan de hand van prototypegegevens een betrouwbaarheidsanalyse van de modelresultaten maken.
- 5.2.4. Verband tussen spreiding en taludhelling en het benodigde aantal stenen onderzoeken.
- 5.2.5. Onderzoek naar een eventuele onder- en bovengrens van de spreiding.

Symbolen

C_D	Sleepkrachtcoefficient
D_{zeef}	Zeefdiameter
D_N	Nominale diameter
g	Zwaartekrachtversnelling
h	Waterdiepte
L	Stortlengte
m	Cotan ϕ
n	Schaalfactor
Re	Reynoldsgetal
T	Toplengte stortprofiel
t	Tijd
w	Valsnelheid
Δ	$\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$
ν	Kinematische viscositeit
σ	Standaardafwijking, maat voor de spreiding
ϕ	Hellingshoek talud stortprofiel

Literatuur

Graf, W.H. (1971)

Hydraulics of Sediment Transport







TABELLEN

1. A. Eigenschappen van gebruikte stortmaterialen
B. Overzicht uitgevoerde stortproeven
2. Spreiding voor verschillende stortmaterialen als functie van de waterdiepte
3. σ/D als functie van de waterdiepte
4. $h/\Delta D$ waarden
5. $\sigma/D = G(h/\Delta D)^\alpha$
6. Talud opbouw voor stortproeven met kif
7. Talud opbouw ($\text{tg } \emptyset$) voor diverse stortmaterialen
8. Talud opbouw (\emptyset) voor diverse stortmaterialen
9. Talud opbouw ($\text{cot } \emptyset$) voor diverse stortmaterialen
10. Spreiding van stortprofiel, omgerekend naar prototype, een waterdiepte, verschillende materialen.
11. Spreiding als functie van waterdiepte voor diverse materialen (model)
12. Verband tussen spreiding en breedte van gestort profiel

FIGUREN

1. Model voor weg die steen aflegt van de steenstorter naar de bodem
2. Weerstandscoefficienten voor verschillende lichamen
3. Weerstandscoefficienten voor verschillende vormcoefficienten
4. Relatie tussen stroombeeld en Reynold-getal voor een cylinder
5. Proefopstelling voor het onderzoek
6. Uitvoering van de steenstorting in het model
7. Te onderscheiden gebieden bij gestort profiel
8. Bepaling standaardafwijking van het gestort profiel
9. Definiëring gestort profiel
10. Spreiding in de valbanden van diverse soorten "stortsteen" in model
11. Presentatie van proefresultaten:
 σ/D vs. $h/\Delta D$; beide parameters op lineaire schaal
12. Presentatie van proefresultaten:
 σ/D vs. $h/\Delta D$; $h/\Delta D$ op logaritmische schaal
13. Presentatie van proefresultaten:
 σ/D vs. $h/\Delta D$; beide parameters op logaritmische schaal
14. Presentatie proefresultaten:
 σ/D vs. $h/\Delta D$; resp. op lineaire en logaritmische schaal voor constante waterdiepte
15. Presentatie proefresultaten:
 σ/D vs. $h/\Delta D$; beide parameters op logaritmische schaal, constante waterdiepte
16. Spreidingsproeven met betonkubussen.
17. Resultaten met groot stortdebiet.
18. "Wegblazen" van reeds gestort materiaal bij een groot stortdebiet
19. Taludhelling als functie van aantal gestorte stenen voor kif.
20. Evenwicht taludhelling na aantal stort
21. Evenwicht taludhelling bij grotere waterdiepte van meer stort

22. Evenwicht taludhelling als functie van $h/\Delta D$ voor kif
23. Evenwicht taludhelling als functie van $h/\Delta D$ voor diverse materialen
24. Met ponsdoppen gestorte profielen
25. Spreiding van gestort profiel als functie van waterdiepte voor diverse materialen
26. Spreiding van gestort profiel als functie van waterdiepte wel en geen randspreiding in rekening gebracht
27. Breedte van gestort profiel als functie van waterdiepte, randspreiding niet in rekening gebracht
28. Begrenzing van gestort profiel voor kif en grond.

eigen- schappen stort- materiaal	ρ [kg/m ³]	D _{zeef} [mm]	D _N [mm]	\bar{w} [m/s]	C _D ⁽¹⁾	Re	S.F.	C _D ⁽²⁾
kif	2650	4-6	5	0.29	1.3	1450	0.7-1	1-1.3
gebroken grind	2650	4-6	4.7	0.22	2.1	1034	0.5	1.8
willekeurig grind	2650	8-11.2	9.2	0.36	1.6	3312	0.7	1.6
beton- kubussen	2300		18.6	0.57	1.0	10000		1.7
pons- doppen	7850		9.8	0.7	1.8	6860		1.7
p.v.c.- granulaat	1400		3.6	0.11	1.6	396		2.0

(1) C_D-waarde berekend uit de gemiddelde valsnelheid

(2) C_D-waarde bepaald met de "shape-factor" (S.F.) en het Reynoldsgetal

tabel 1A
eigenschappen stortmaterialen

stortmateriaal	waterdiepte (m)	stortlengte (m)	storthoogte	storthelling	hoeveelheid stortsteen	aantal stort op één lokatie
kif, 4-6 mm	0,2-0,3-0,4- 0,5-0,6-0,7- 0,8-0,9	0,15	0,03	(1)	1500	1
					1500	2
					3000	1
	0,3-0,5-0,7-0,9	0,15	0,03	(1)	1500	8
gebroken grind, 4-6 mm	0,2-0,3-0,4-0,5 0,6-0,7-0,8-0,9	0,15	0,03	(1)	1500	1
					3000	2
grind, 8-11 mm	0,3-0,5-0,7-0,9	0,15	0,03	(1)	750	2
p.v.c.-granulaat	0,3-0,5-0,7-0,9	0,15	0,03	(1)	3000	2
ponsdoppen	0,3-0,5-0,7-0,9	0,05	0,03	(1)	500	1
betonkubussen	0,3-0,5-0,7-0,9	0,05	0	(2)	100-150-250	3

(1) storthelling zodanig gekozen dat stortmateriaal langzaam over de rand valt

(2) met de hand gestort vanaf het wateroppervlak

tabel 1B
overzicht proeven

materiaal	waterdiepte [m]							
	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif,4-6mm	5.2	5.1	5.0	4.5	4.0	3.6	3.1	2.9
gebroken grind,4-6mm	4.4	4.7	4.3	4.1	3.7	3.1	2.8	2.1
grind,8-11mm	7.9		6.7		5.4		4.5	
p.v.c.-gra- nulaat	2.6		2.5		2.7		2.2	
ponsdoppen	14.5	13.4	12.2	10.9	8.0	5.9	4.0	4.2

tabel 2

spreiding in [cm] voor verschillende stort-
materialen als functie van de waterdiepte

materiaal	waterdiepte [m]							
	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif,4-6mm	10.5	10.1	10.1	9.0	8.1	7.1	6.2	5.8
gebroken grind,4-6mm	9.4	10.0	9.2	8.6	7.9	6.6	6.0	4.5
grind,8-11mm	8.6		7.3		5.8		4.9	
p.v.c.-granu- laat	7.2		7.0		7.4		6.0	
ponsdoppen	14.8	13.6	12.5	11.1	8.2	6.0	4.1	4.2

tabel 3

σ/D als functie van de water diepte

materiaal	waterdiepte [m]							
	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif,4-6mm	107.9	97.0	84.9	72.7	60.6	48.5	36.4	24.2
gebroken grind,4-6mm	114.8	103.2	90.3	77.4	64.5	51.6	38.9	25.8
grind,8-11mm	58.6	52.7	46.1	39.5	32.9	26.4	19.8	13.2
p.v.c.-gra- nulaat	618.2	555.6	486.1	416.7	347.2	277.8	208.3	138.9
ponsdoppen	13.3	11.9	10.4	8.9	7.5	6.0	4.5	3.0

tabel 4
h/ΔD-waarden

materiaal	D_N [m]	ΔD [m]	α	c	$\frac{D}{D} = C \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^\alpha$
kif, 4-6mm	$5 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,44	1,34	$\frac{D}{D} = 1,34 \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^{0,44}$
gebroken grind, 4-6mm	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,90	$\frac{D}{D} = 0,90 \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^{0,51}$
grind, 8-11mm	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,51	1,03	$\frac{D}{D} = 1,03 \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^{0,51}$
p.v.c.-gra- nulaat	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,16	2,71	$\frac{D}{D} = 2,71 \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^{0,16}$
ponsdoppen	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	1,22	0,69	$\frac{D}{D} = 0,69 \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^{1,22}$

tabel 5

$\frac{D}{D} = C \left(\frac{R}{\Delta D}\right)^\alpha$ berekend m.b.v. de kleinste kwadratenmethode

water- diepte	stort 1	stort 2	stort 3	stort 4	stort 5	stort 6	stort 7	stort 8
0.30	0.35	0.34	0.505	0.568	0.620	0.690		
0.50		0.293		0.490		0.597		0.600
0.70	0.120	0.220	0.347	0.440	0.510	0.630		0.510
0.90	0.133	0.210	0.240	0.314	0.460	0.590	0.510	0.600

$\tan \phi$

water- diepte	stort 1	stort 2	stort 3	stort 4	stort 5	stort 6	stort 7	stort 8
0.30	19	19	27	30	32	35		
0.50		16		26		31		31
0.70	7	12	19	24	27	32		27
0.90	8	12	14	17	25	31	27	31

ϕ

water- diepte	stort 1	stort 2	stort 3	stort 4	stort 5	stort 6	stort 7	stort 8
0.30	2.9	2.9	2.0	1.8	1.6	1.5		
0.50		3.4		2.0		1.7		1.7
0.70	8.3	4.5	2.9	2.3	2.0	1.6		2.0
0.90	7.5	4.8	4.2	3.2	2.2	1.7	2.0	1.7

$\cotan \phi$

tabel 6
taludopbouw kif (1 stort=1500st.)

materiaal	hoeveelheid stortmat.	waterdiepte [m]							
		0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif, 4-6mm	1500	0.126	0.134	0.154	0.181	0.259	0.400	0.326	0.428
	3000	0.222	0.267	0.251	0.267	0.302	0.364	0.492	0.550
gebroken grind, 4-6mm	1500	0.205	0.208	0.208	0.152	0.231	0.190	0.385	0.650
	3000	0.356	0.271	0.305	0.320	0.387	0.436	0.573	0.800
grind, 8-11mm	750	0.124		0.172		0.213		0.367	
	1500	0.274		0.413		0.377		0.557	
p.v.c.-gra- nulaat	3000	0.405		0.342		0.518		0.591	
	6000	0.503		0.754		0.450		0.650	
ponnsdoppen	500	0.590	0.700	0.600	0.650	0.750	0.590	0.580	0.610

tabel 7

taludopbouw uitgedrukt in $\tan \phi$

materiaal	hoeveelheid stortmat.	waterdiepte [m]							
		0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif, 4-6mm	1500	7.2	7.6	8.8	10.3	14.5	21.8	18.1	23.2
	3000	12.5	15.0	14.1	15.0	16.8	20.0	26.2	29.0
gebroken grind, 4-6mm	1500	11.6	11.7	11.7	8.6	13.0	10.8	21.1	33.0
	3000	19.6	15.2	17.0	17.8	21.2	23.6	29.8	38.7
grind, 8-11mm	750	7.1		9.8		12.0		20.2	
	1500	15.3		22.4		20.7		29.2	
p.v.c.-granulaat	3000	22.0		18.9		27.4		30.6	
	6000	27.0		37.0		24.0		33.0	
ponsdoppen	500	30.5	35.0	31.0	33.0	36.9	30.5	30.1	31.3

tabel 8
taludopbouw uitgedrukt in ϕ (graden)

materiaal	hoeveelheid stortmat.	waterdiepte [m]							
		0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20
kif, 4-6mm	1500	7.9	7.5	6.5	5.5	3.9	2.5	3.1	2.4
	3000	4.5	3.8	4.0	3.8	3.3	2.7	2.0	1.8
gebroken grind, 4-6mm	1500	4.9	4.8	4.8	6.6	4.3	5.2	2.6	1.5
	3000	2.8	3.7	3.3	3.1	2.6	2.3	1.8	1.3
grind, 8-11mm	750	8.0		5.8		4.7		2.7	
	1500	3.7		2.4		2.7		1.8	
p.v.c.-granulaat	3000	2.5		2.9		1.9		1.7	
	6000	2.0		1.3		2.2		1.5	
ponsdoppen	500	1.7	1.4	1.7	1.5	1.3	1.7	1.7	1.6

tabel 9
taludopbouw uitgedrukt in $\cotan \phi$

materiaal	n_{Δ}	n_D	n_{C_D}	n_h	C	formule	geldigheidsgebied
kif, 4-6mm	1	64	1	8	1,34	$p = 1,4 \cdot h^{0,44}$	1,6 h_p 7,2
gebroken grind, 4-6mm	1	68	1	8,2	0,90	$p = 1,2 \cdot h^{0,51}$	1,6 h_p 7,4
grind, 8-11mm	1	34,8	1	5,9	1,03	$p = 1,1 \cdot h^{0,51}$	1,2 h_p 5,3
ponsdoppen	0,24	32,7	1	2,8	0,69	$p = 1,7 \cdot h^{1,22}$	0,6 h_p 2,5

tabel 10

spreidingsformules voor het prototype

	waterdiepte (m)							
	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20
stortmateriaal	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20
kif, 4-6 mm	3,9	4,0	4,0	3,7	3,4	3,2	2,8	2,7
gebroken grind 4-6 mm	3,3	3,5	3,4	3,4	3,1	3,0	2,6	2,0
grind, 8-11 mm	5,4	-	5,3	-	4,9	-	4,5	-
p.v.c.-granulaat	2,4	-	2,4	-	-	-	-	-
ponsdoppen	2,7	3,1	3,3	3,1	3,0	3,8	4,0	5,0

tabel 11.
spreiding in (cm)

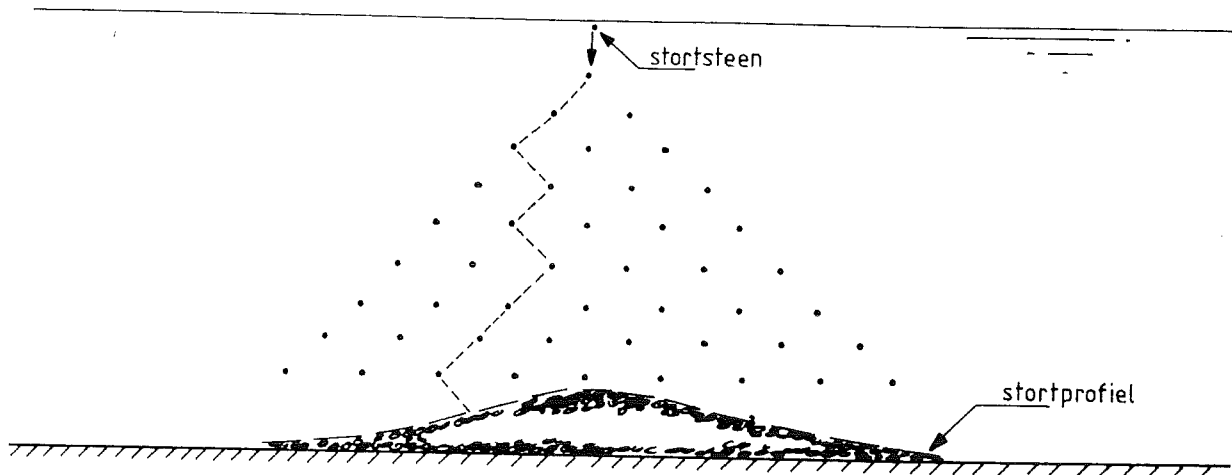
water- diepte (m)	kif			gebroken grind			grind		
	B	σ	B/ σ	B	σ	B/ σ	B	σ	B/ σ
0,90	15,9	3,9	4,1	13,8	3,3	4,2	23	5,4	4,3
0,80	16,9	4,0	4,2	15,3	3,5	4,4	-	-	-
0,70	18,0	4,0	4,5	14,6	3,4	4,3	24,3	5,3	4,6
0,60	15,8	3,7	4,3	13,5	3,4	4,0	-	-	-
0,50	15,1	3,4	4,4	13,4	3,1	4,3	20,3	4,9	4,1
0,40	14,3	3,2	4,5	12,5	3,0	4,2	-	-	-
0,30	12,3	2,8	4,4	11,5	2,6	4,4	19,3	4,5	4,3
0,20	12,3	2,7	4,6	9	2,0	4,5	-	-	-

$$\overline{\frac{B}{\sigma}} = 4,4$$

$$\overline{\frac{B}{\sigma}} = 4,3$$

$$\overline{\frac{B}{\sigma}} = 4,3$$

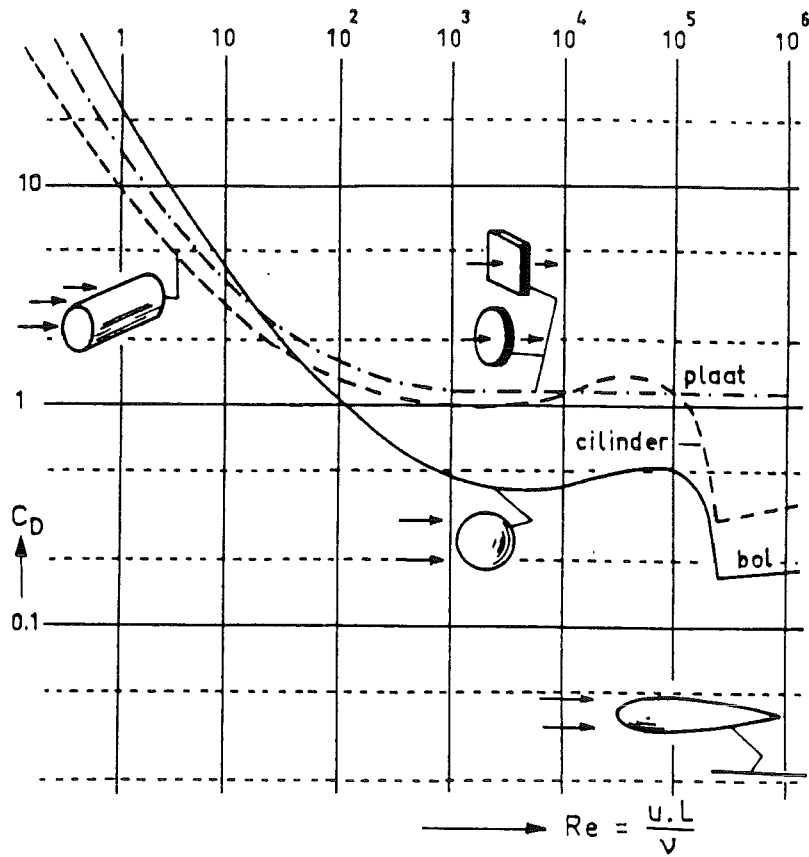
tabel 12.
verband tussen de spreiding σ en
de stortbreedte B.



- . : punt van links/rechts-keuze
- : voorbeeld van een weg afgelegd door een stortsteen

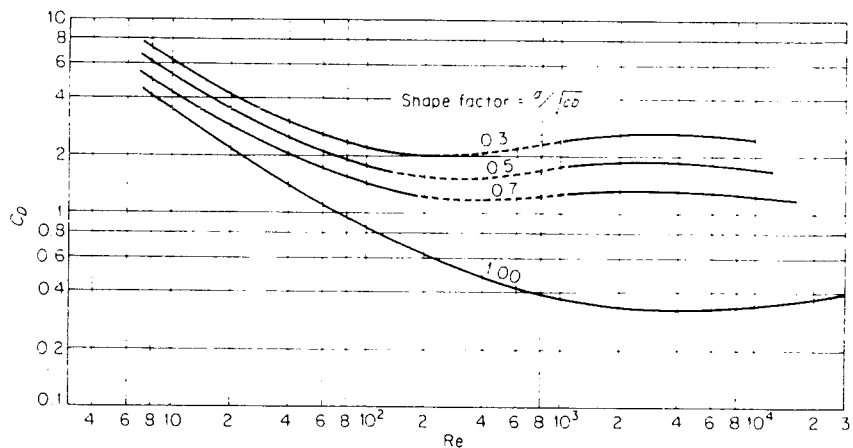
fig.1

Model voor de weg die een stortsteen aflegt van de steen-
storter naar de bodem. Volgens dit model zal het stortprofiel
een normale verdeling benaderen.



Weerstandscoefficiënt $C_D = f(Re)$

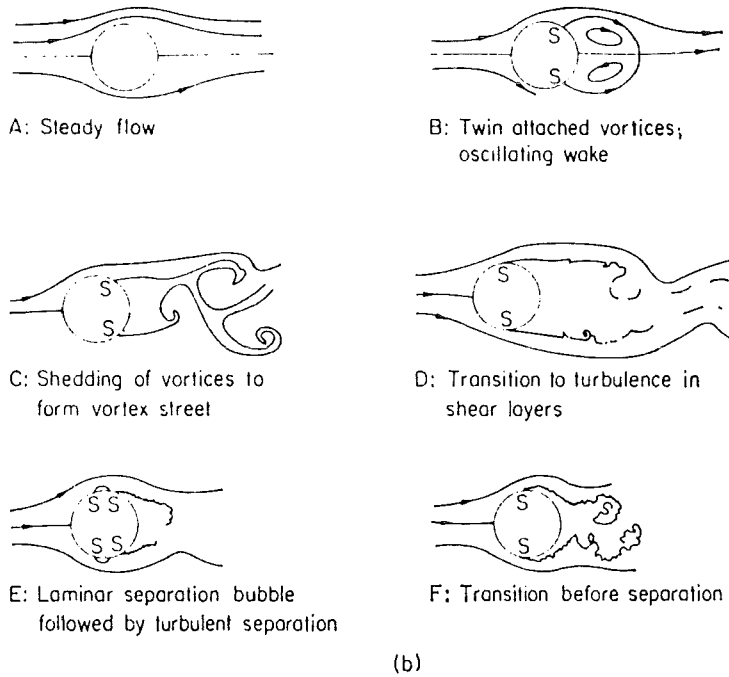
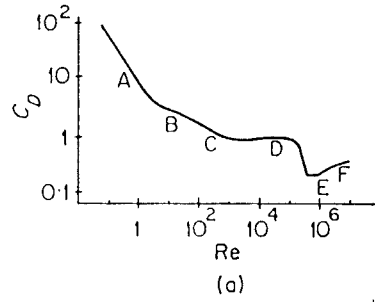
fig. 2 Weerstandscoefficiënt $C_D = f(Re)$
 (bron: b72-collegedictaat, THDelft)



Drag coefficient vs. Reynolds number for different shape factors. [After ALBERTSON (1953).]

fig. 3 (bron: Graf, W.H. Hydraulics of Sediment Transport)

THE PROBLEMS OF TURBULENCE

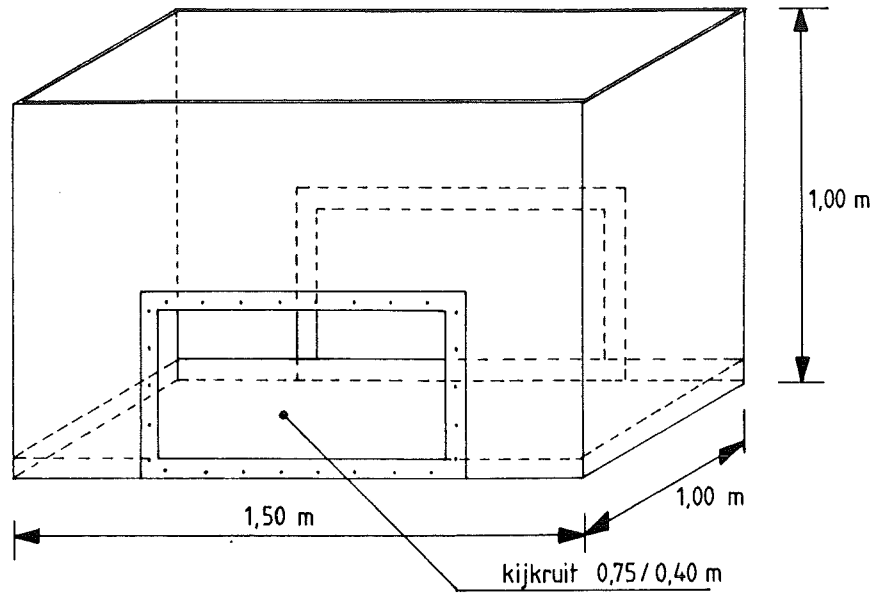


Relationship between drag of a circular cylinder and turbulence, illustrating the roles of separation and transition. (a) Drag presented in the form of drag coefficient C_D vs Reynolds number Re based on the cylinder diameter. (b) Flow patterns around cylinder for increasing Reynolds numbers corresponding to labels in (a), after Morkovin

fig. 4

bron: Reynolds, A.J. Turbulent flows in engineering

metalen bak met kijk-
ruiten voor de model-
proeven



doorsnede over de
proefopstelling in
de metalen bak

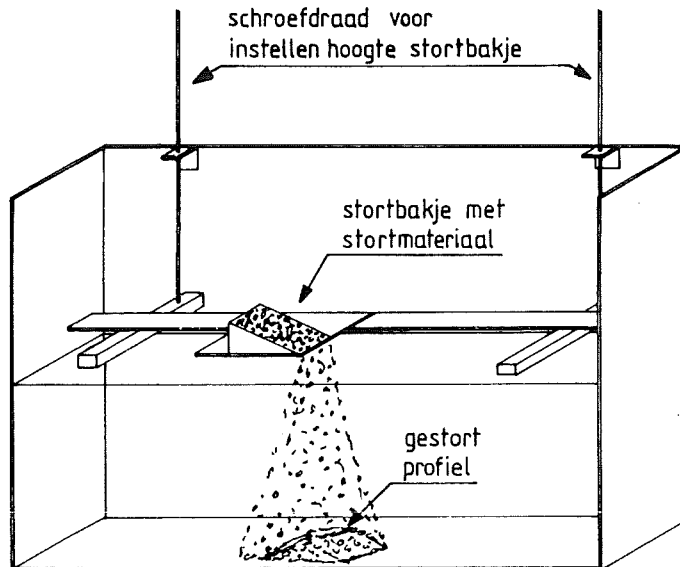


fig. 5

proefopstelling

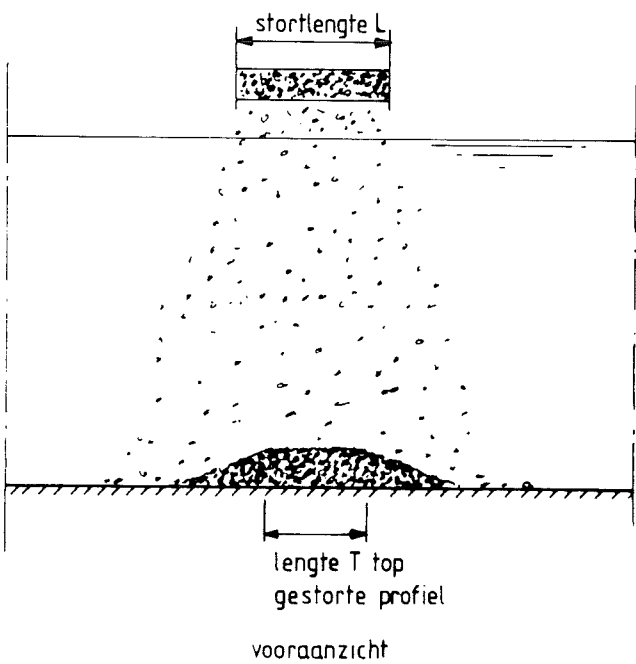
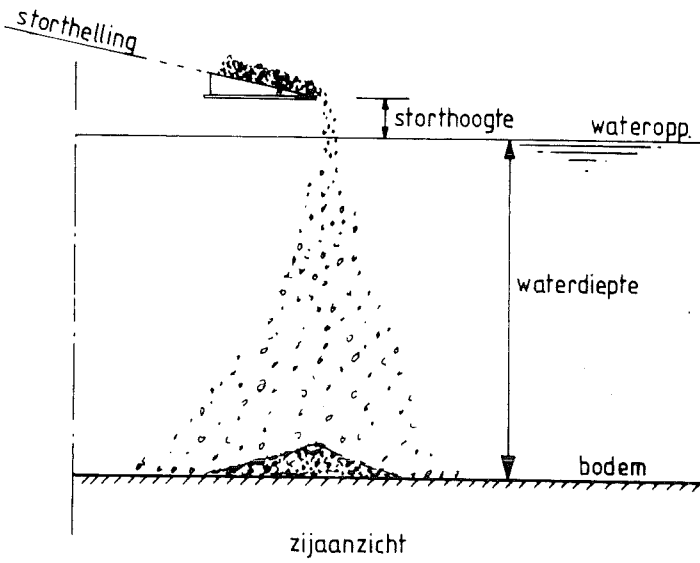


fig.6

steenstorting in het model
 De storthelling,-hoogte,-lengte,de waterdiepte en
 de hoeveelheid en type stortmateriaal zijn de va-
 riabele parameters

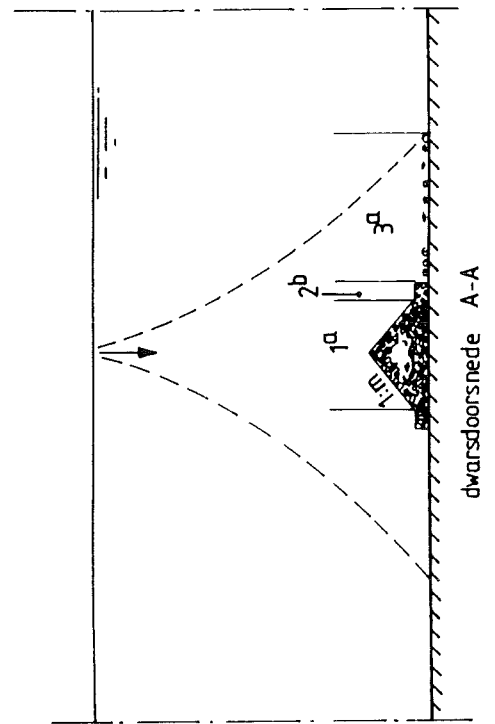
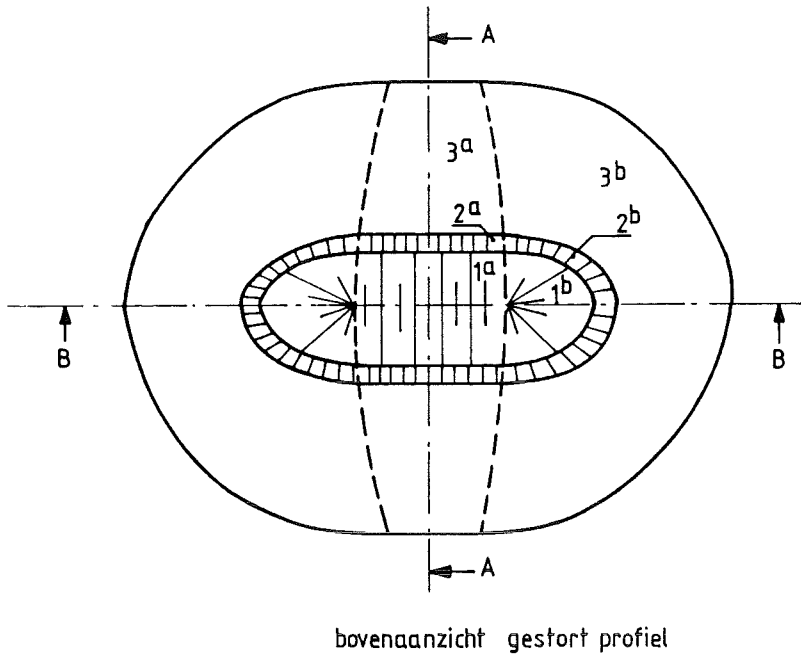
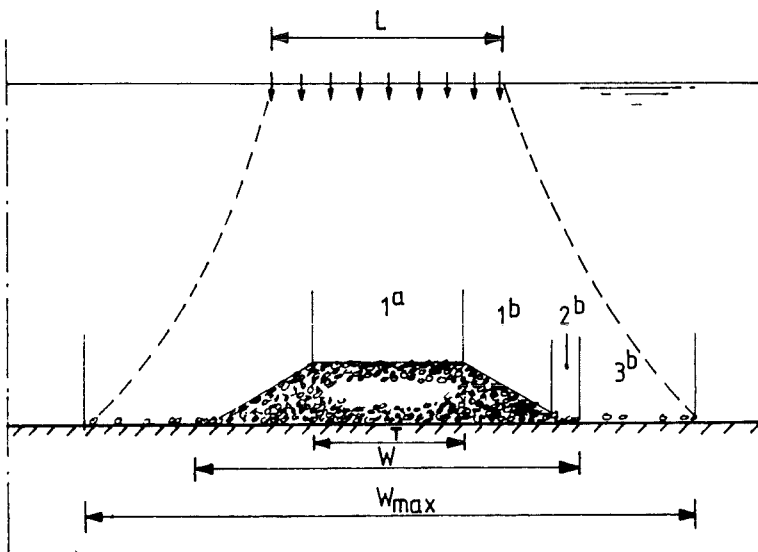


fig.7



Te onderscheiden gebieden bij gestort profiel:

- 1.: gestapelde stenen
- 2.: aaneengesloten laag ongestapelde stenen
- 3.: los verspreide stenen
- a.: te bestuderen geheel, 2 dim. situatie
- b.: randgebied, 3 dim. situatie

---: begrenzing randinvloed.

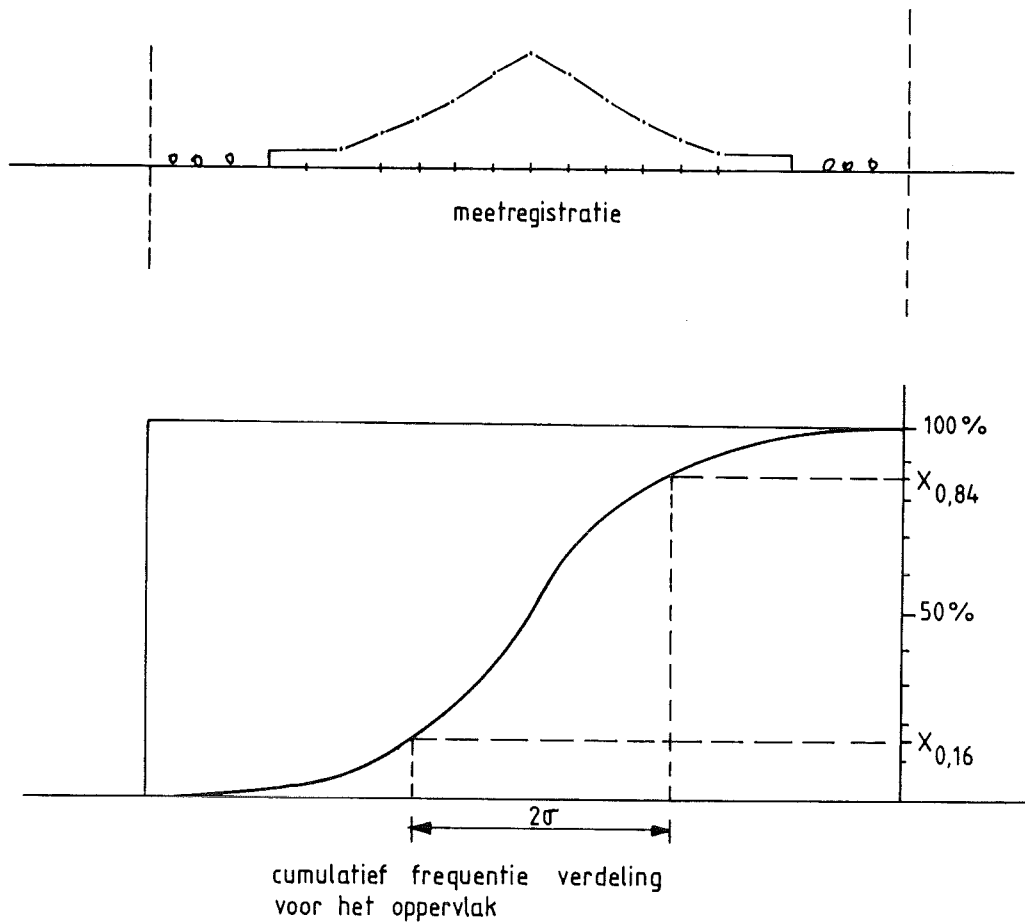


fig. 8
Bepaling standaardafwijking (=spreiding)

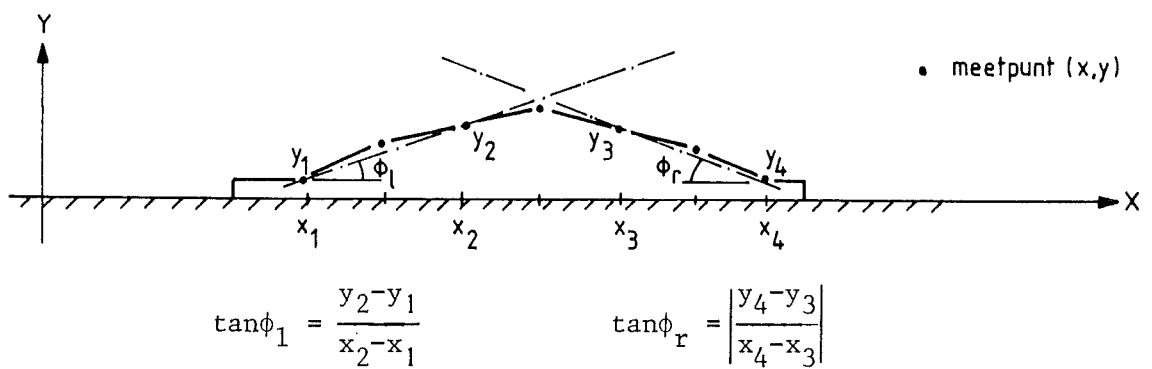
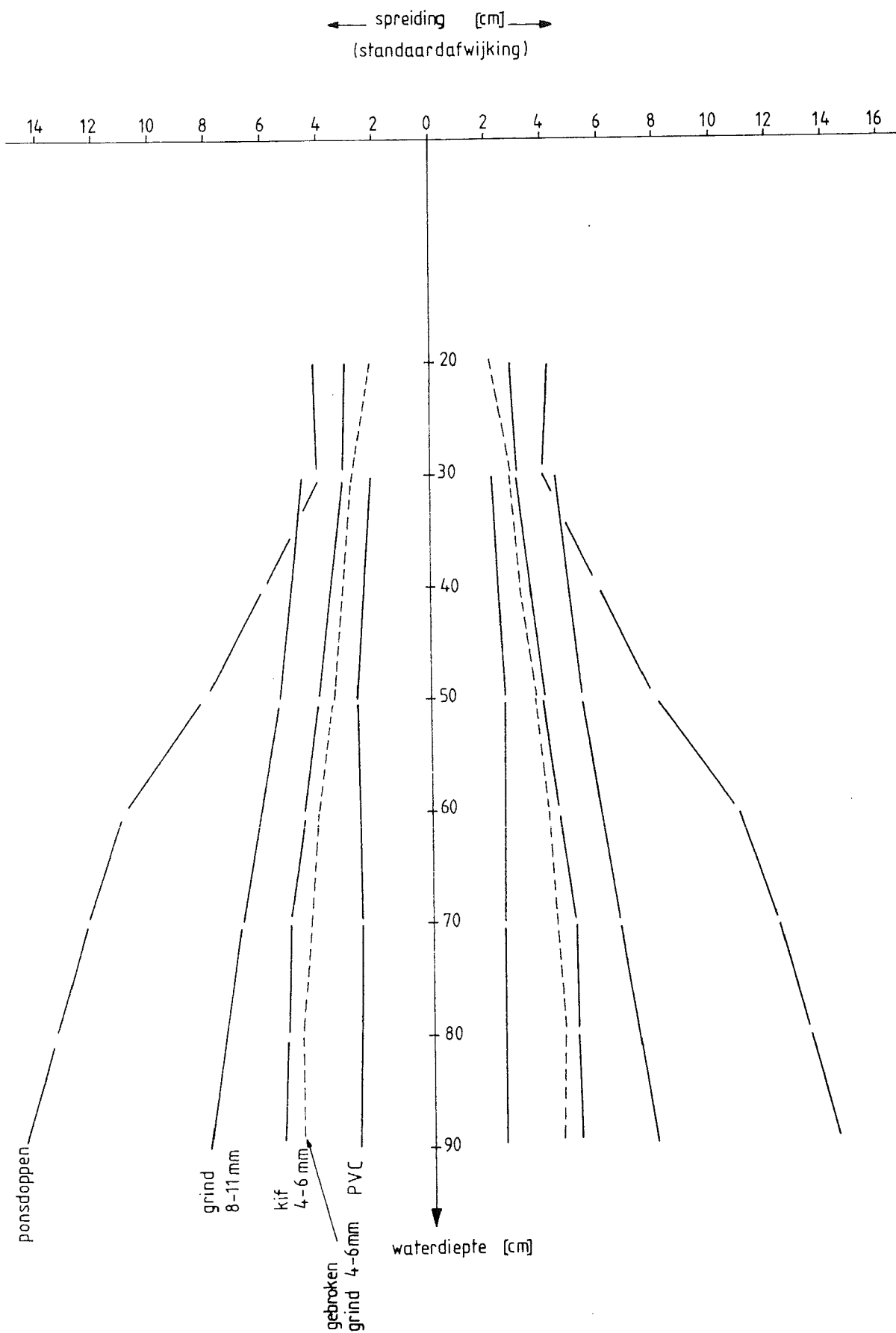


fig.9
Bepaling taludopbouw uit meetregistratie

fig.10



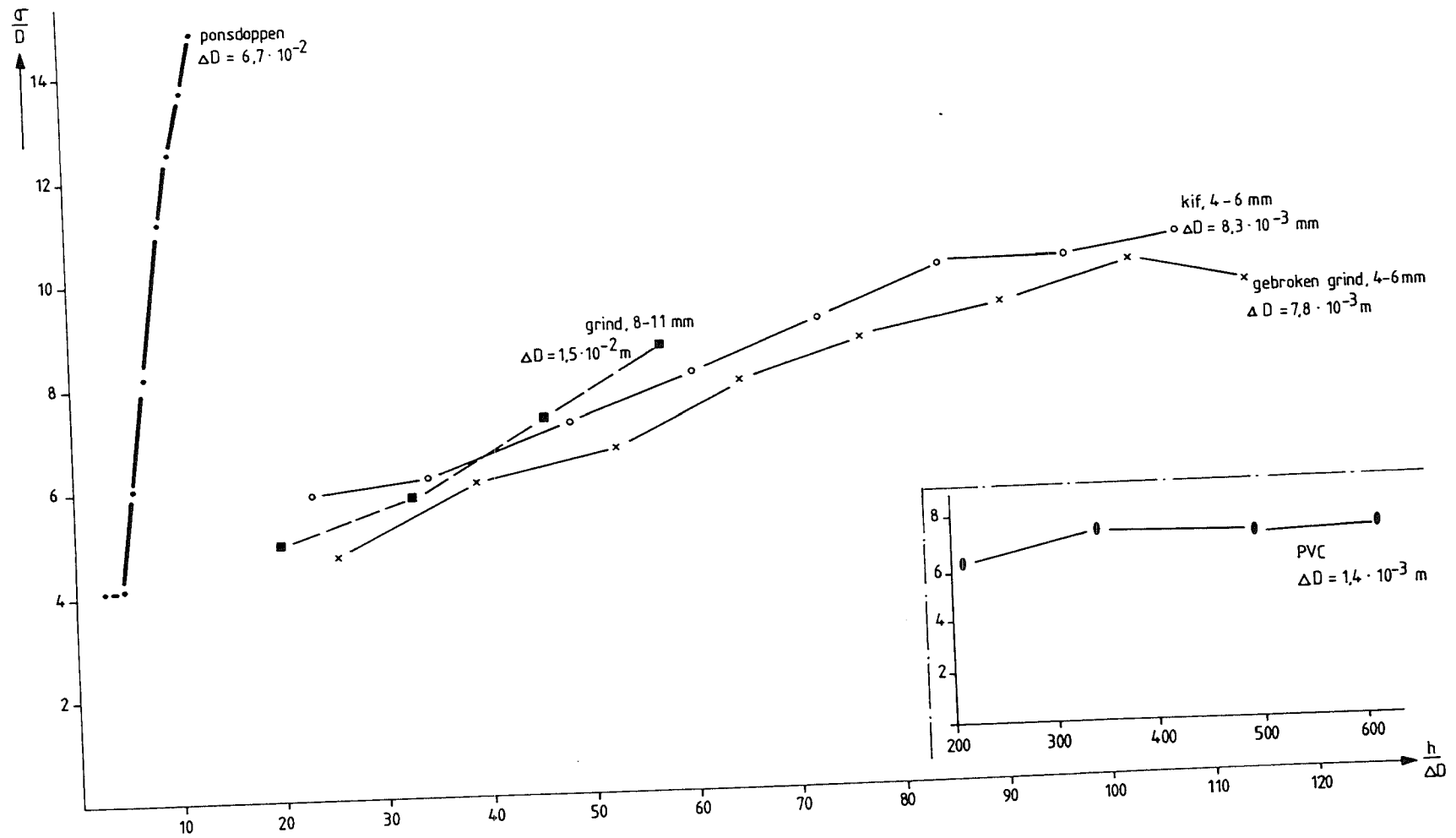


fig. 11

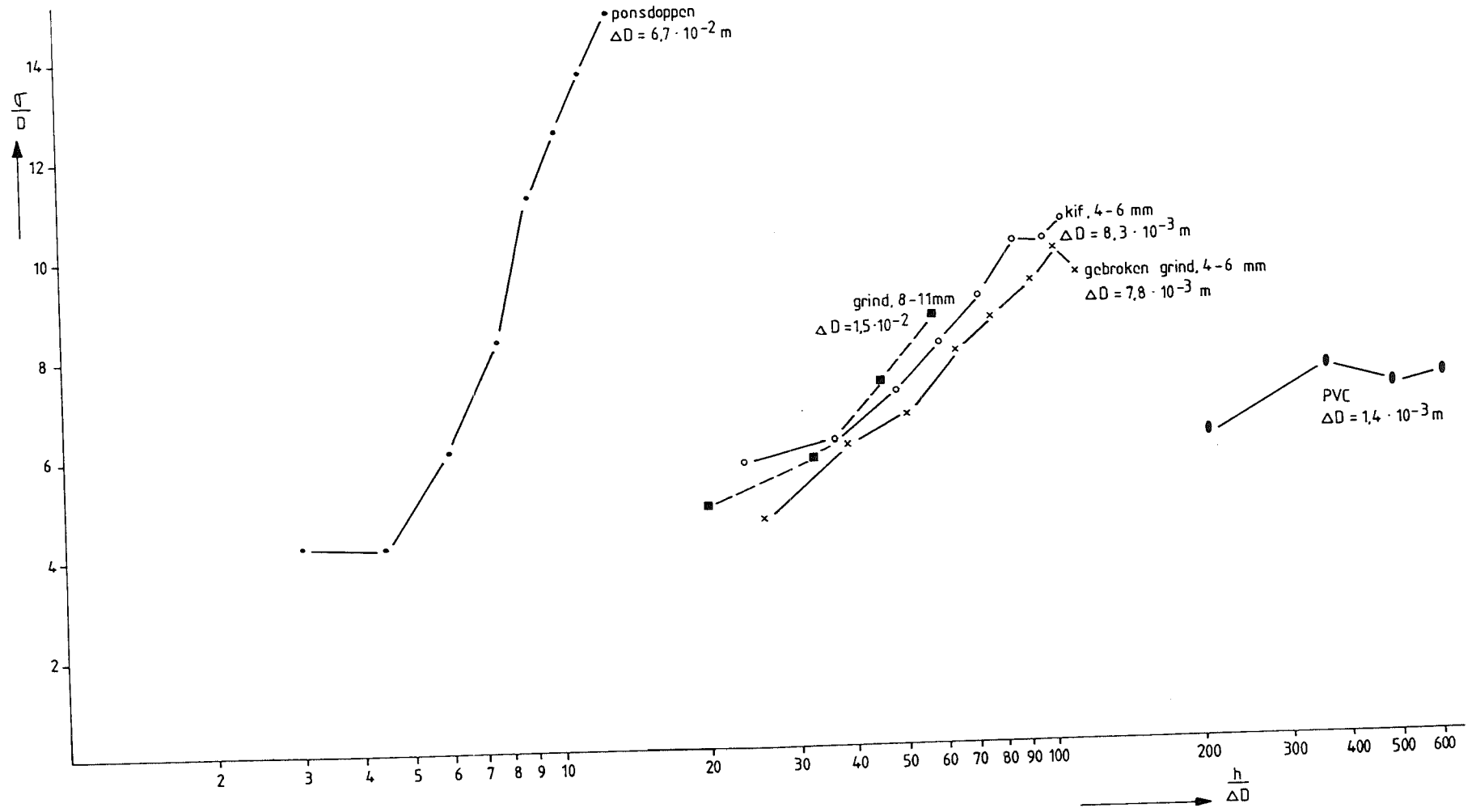


fig. 12

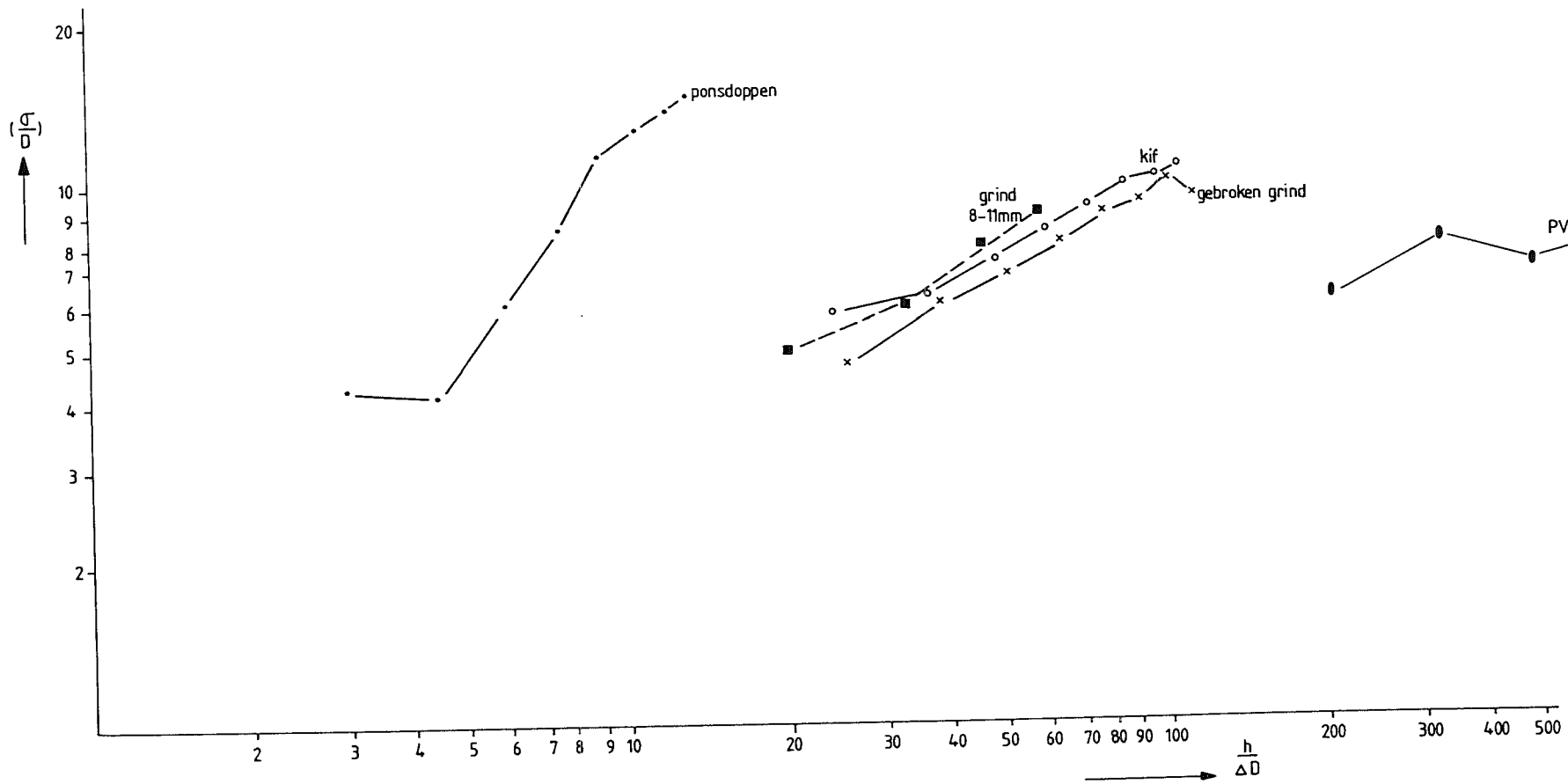
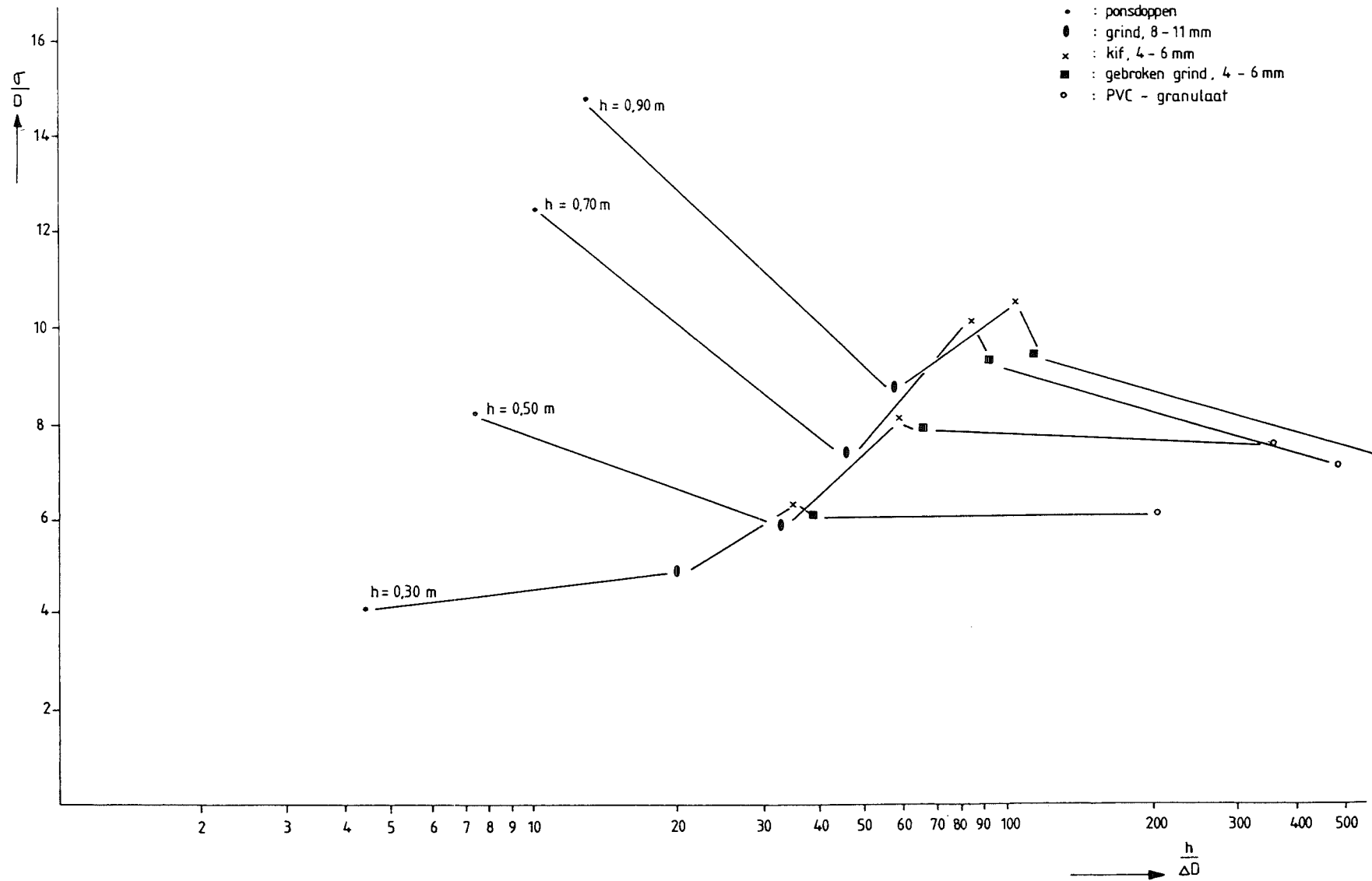


fig. 13

fig. 14



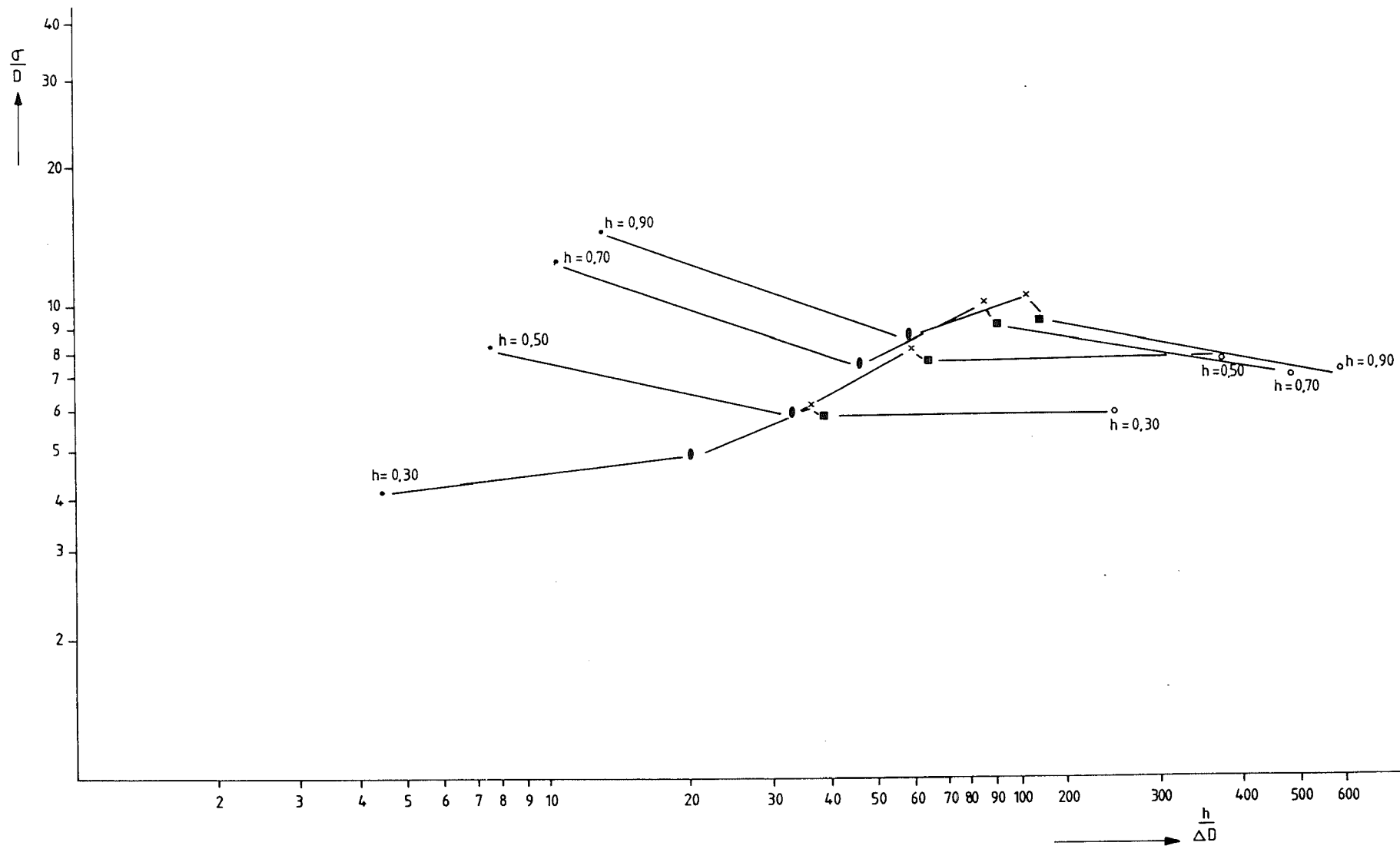


fig. 15

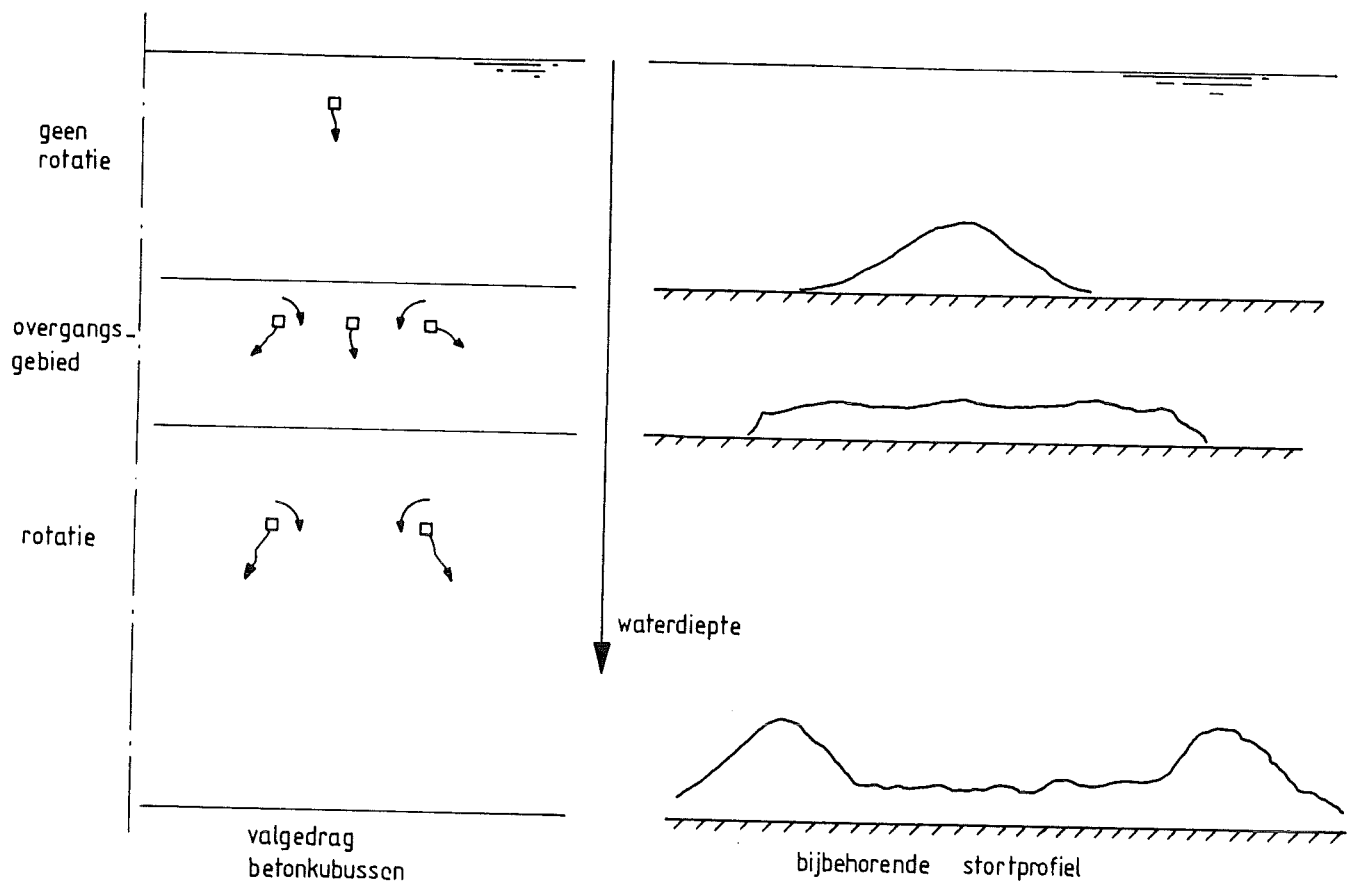


fig. 16

Spreidingsproeven met
de betonkubussen

stortlengte: 15 cm
steensoort : kif, 4-6 mm
hoeveelheid: 3000 stenen

waterdiepte : 50 cm
storthoogte : 3 cm
storthelling: 1:2,5

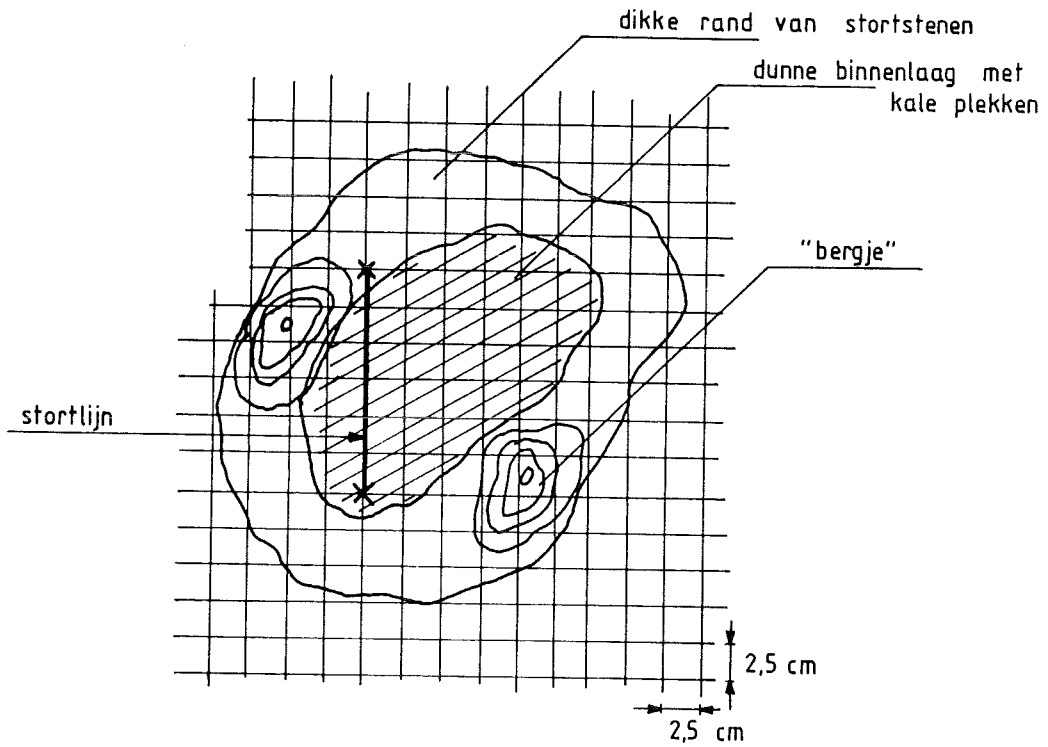


fig. 17

resultaat stortproef uitgevoerd
met te groot stortdebiet

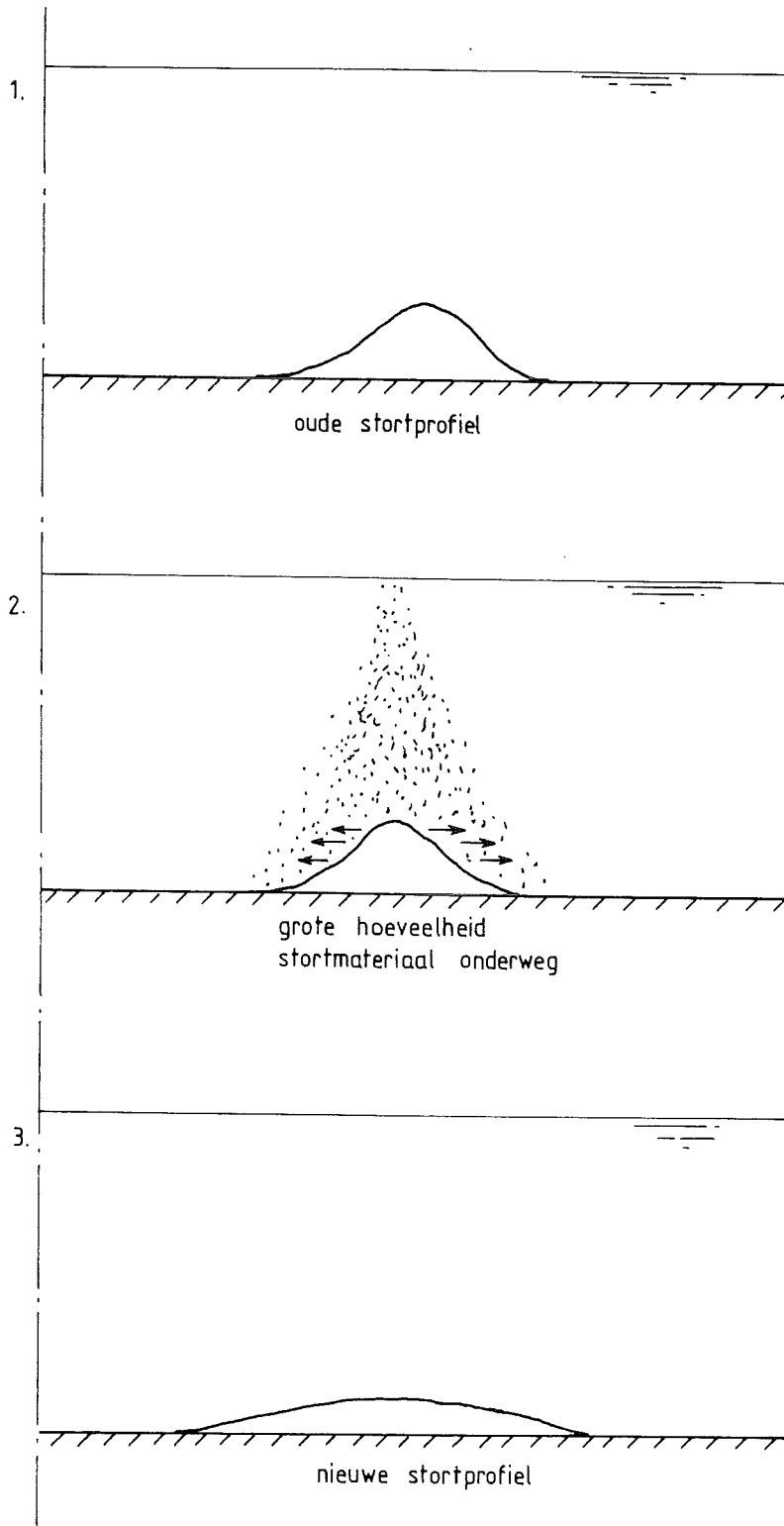


fig. 18

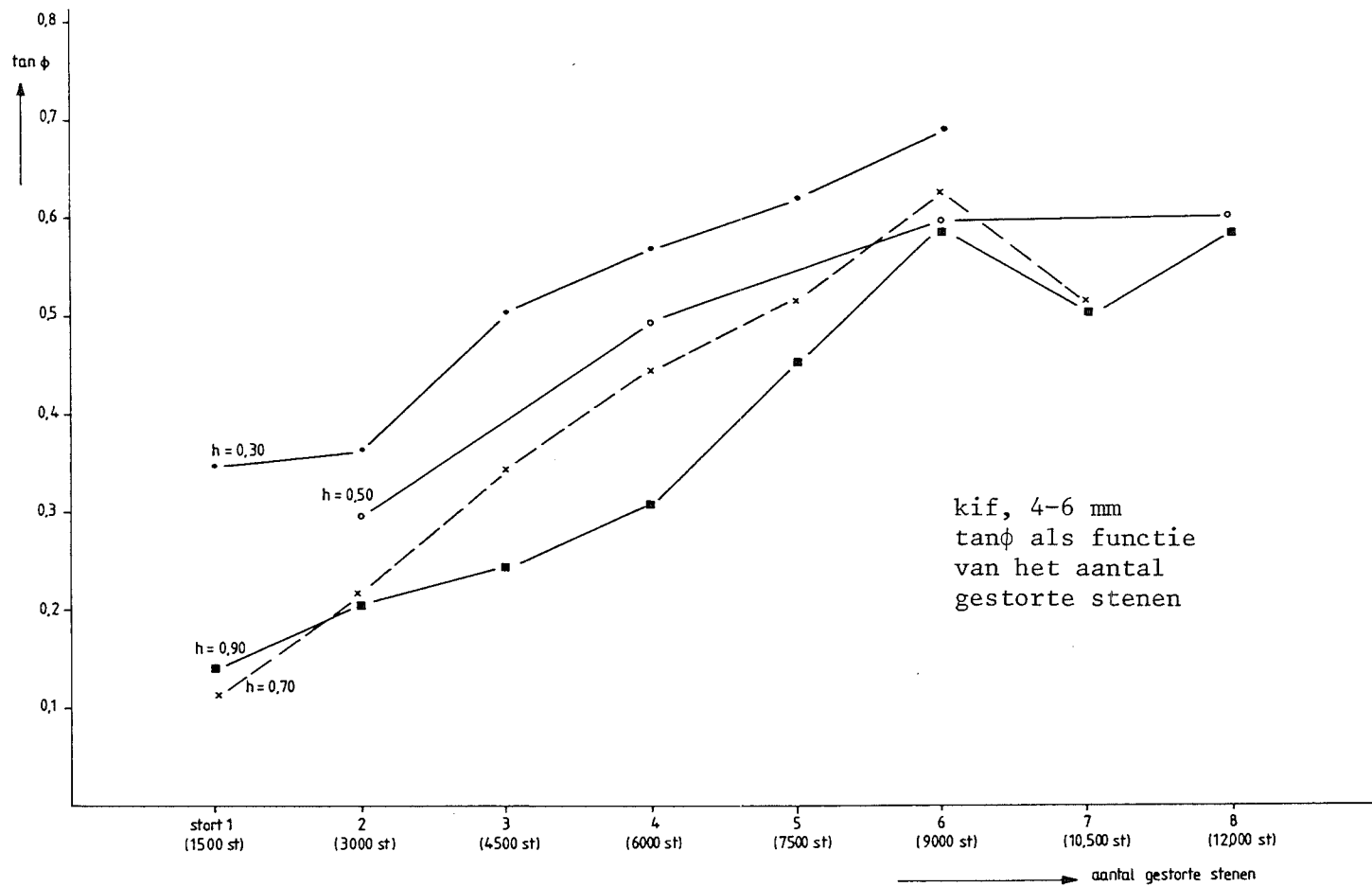


fig.19

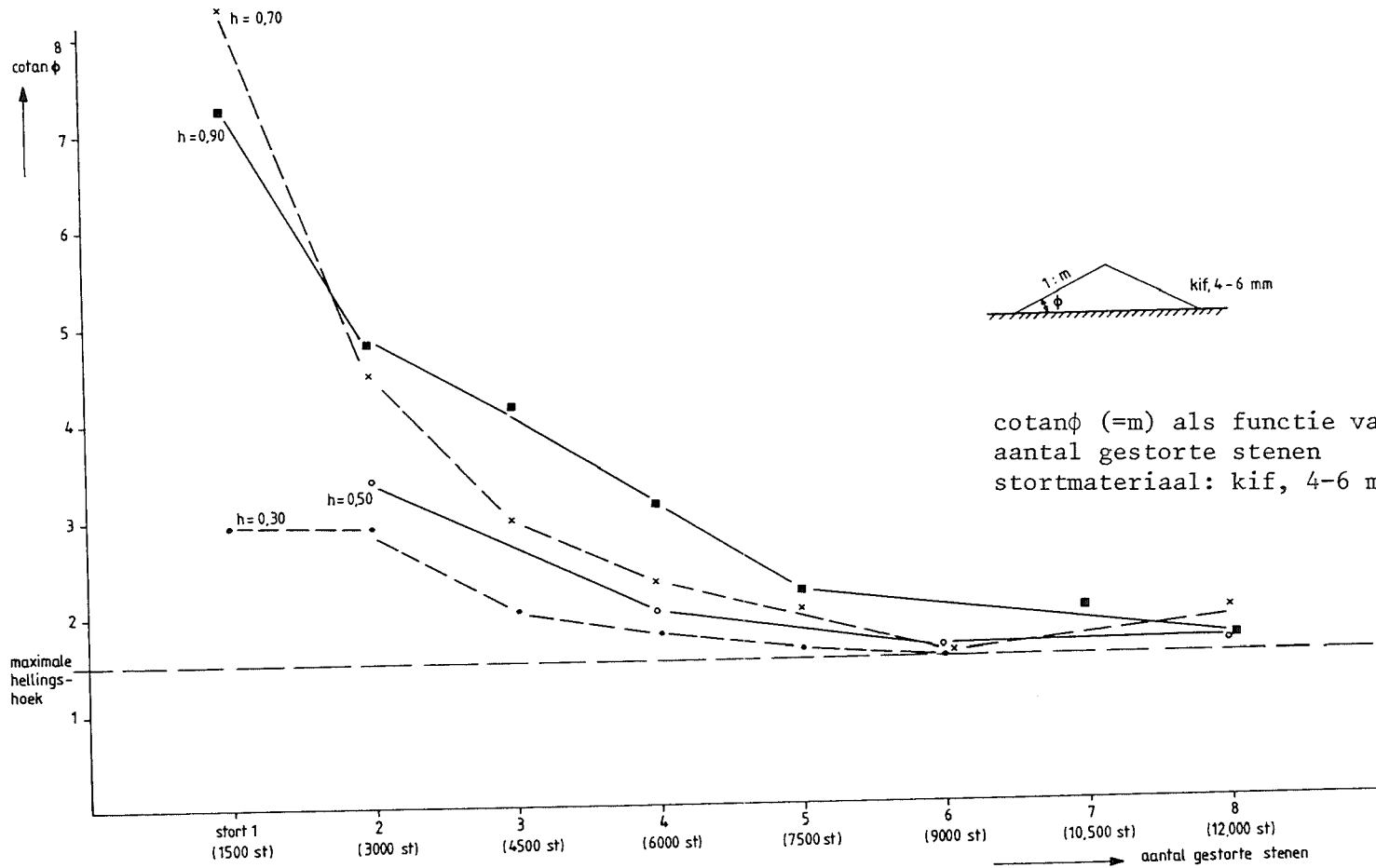


fig.20

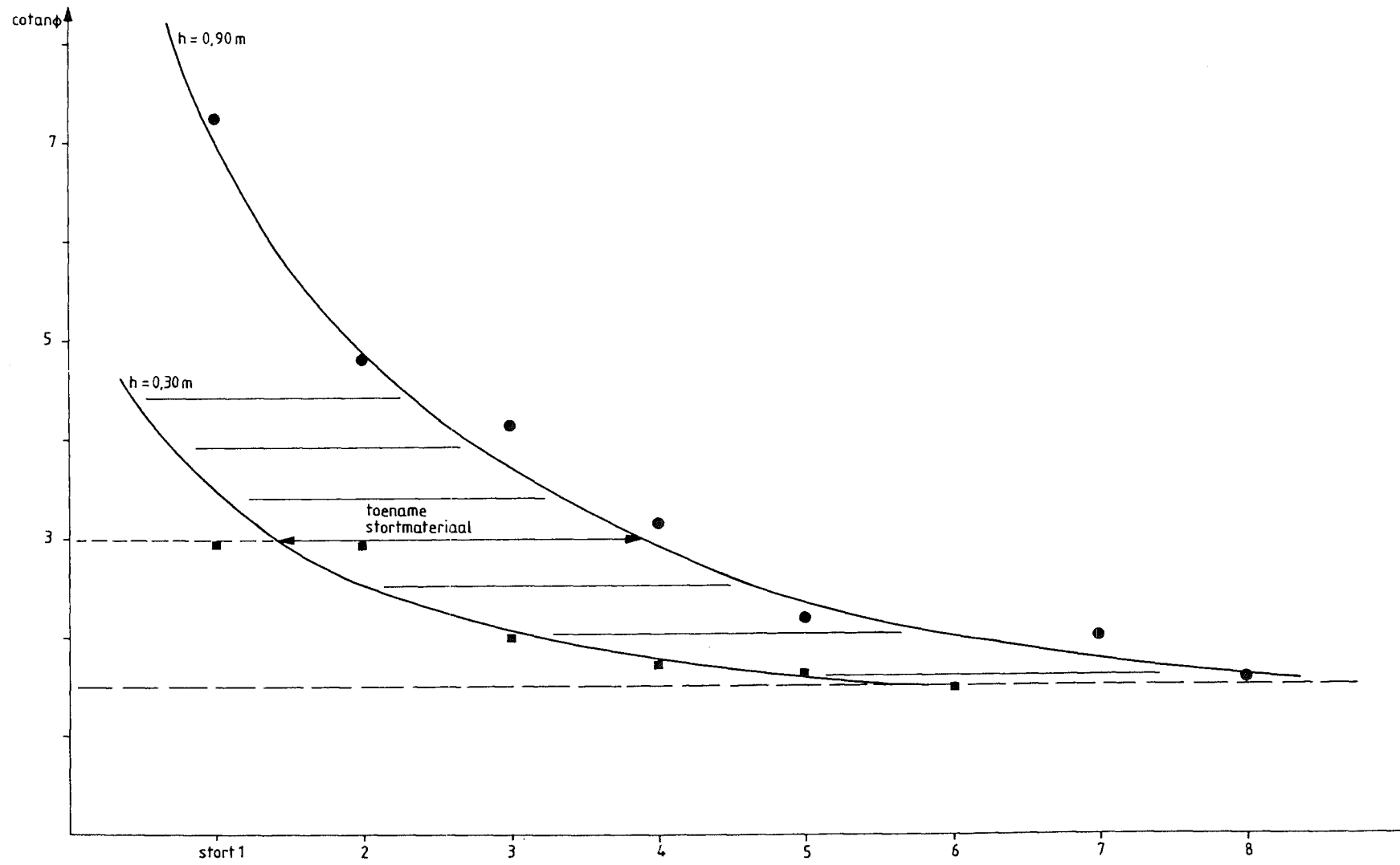


fig. 21

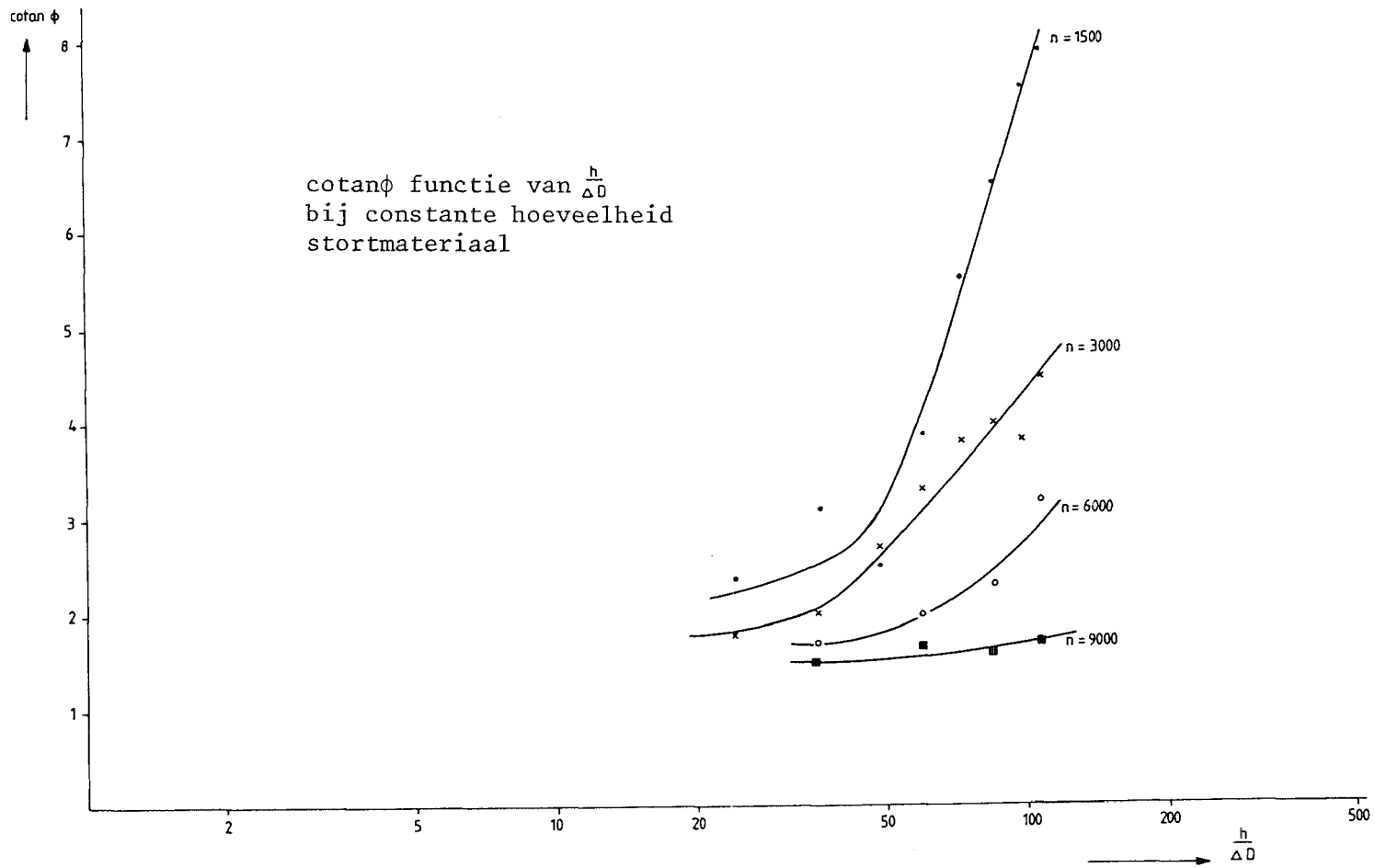


fig. 22

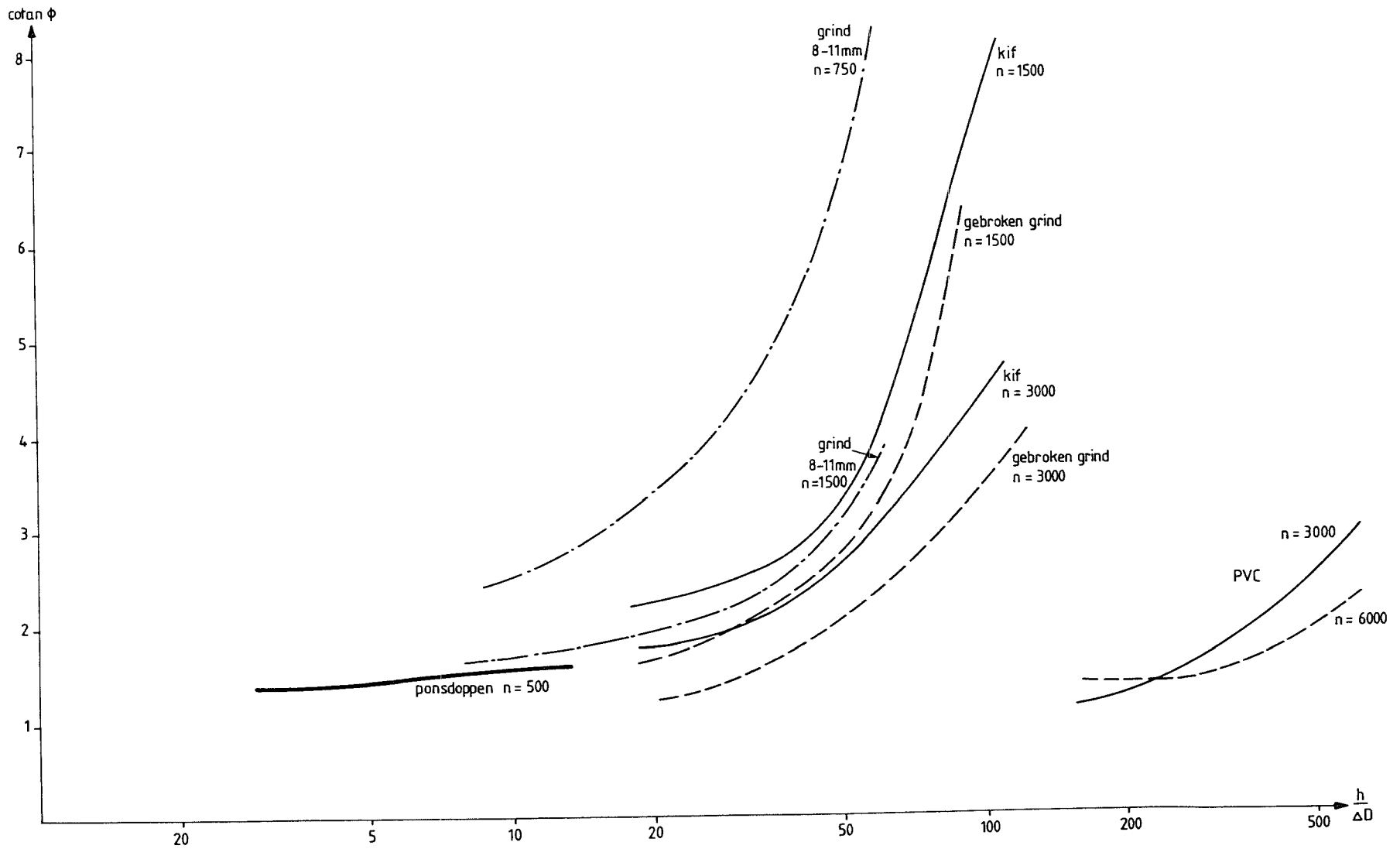


fig. 23

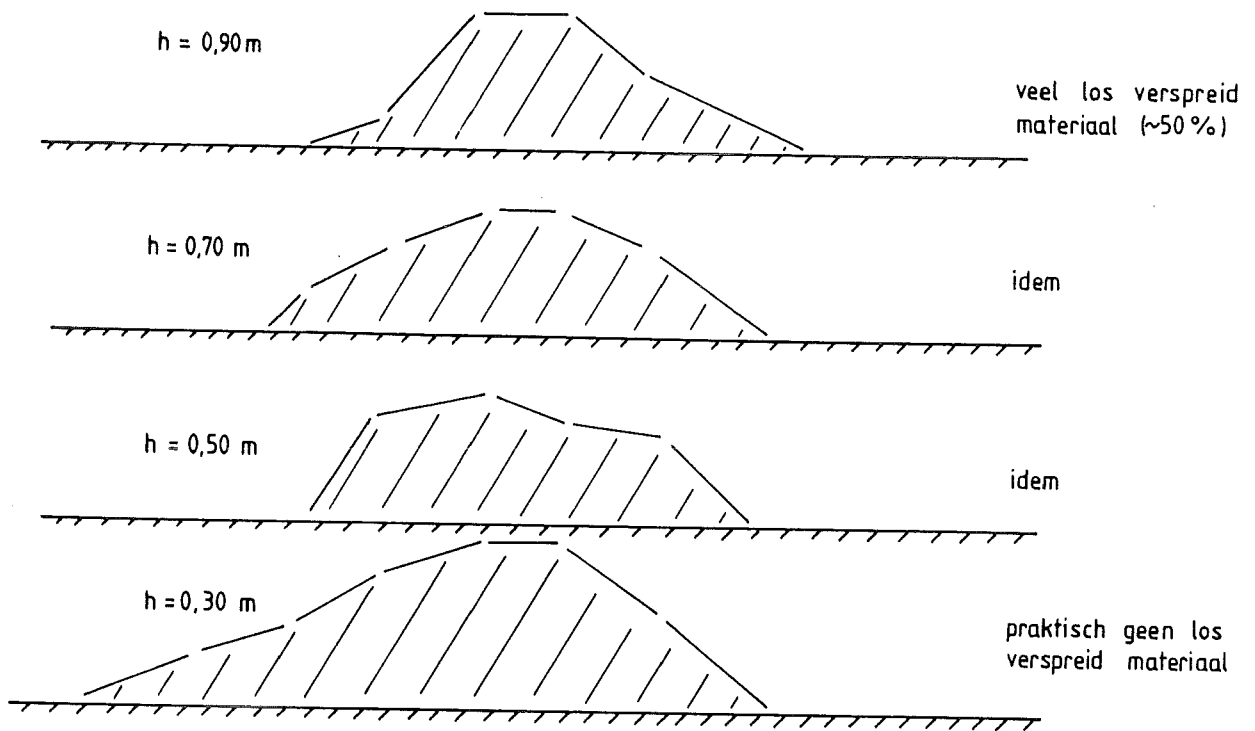


fig. 24

Enkele stortprofielen opgebouwd uit ponsdoppen

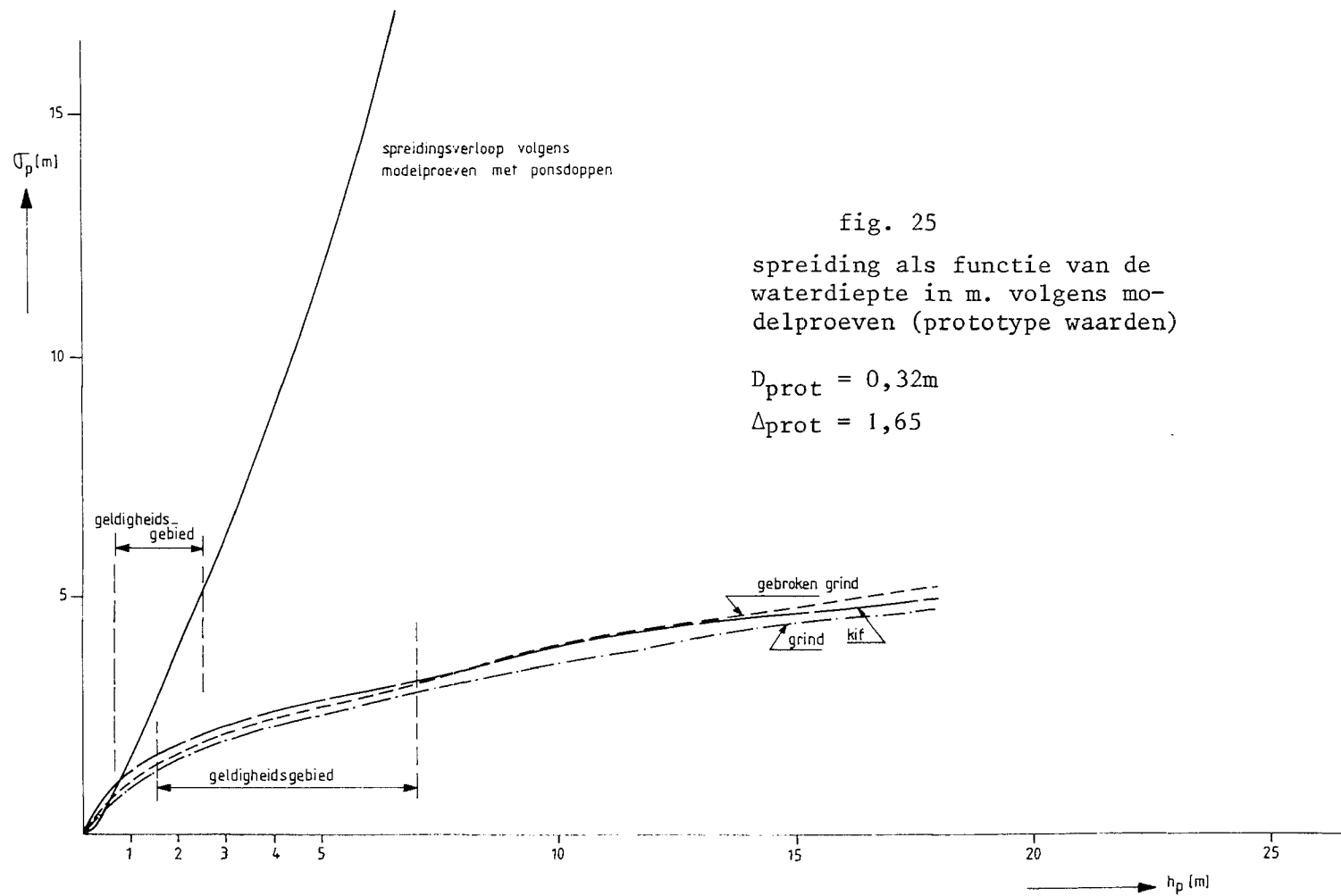


fig. 25

spreiding als functie van de waterdiepte in m. volgens modelproeven (prototype waarden)

$D_{\text{prot}} = 0,32\text{m}$

$\Delta_{\text{prot}} = 1,65$

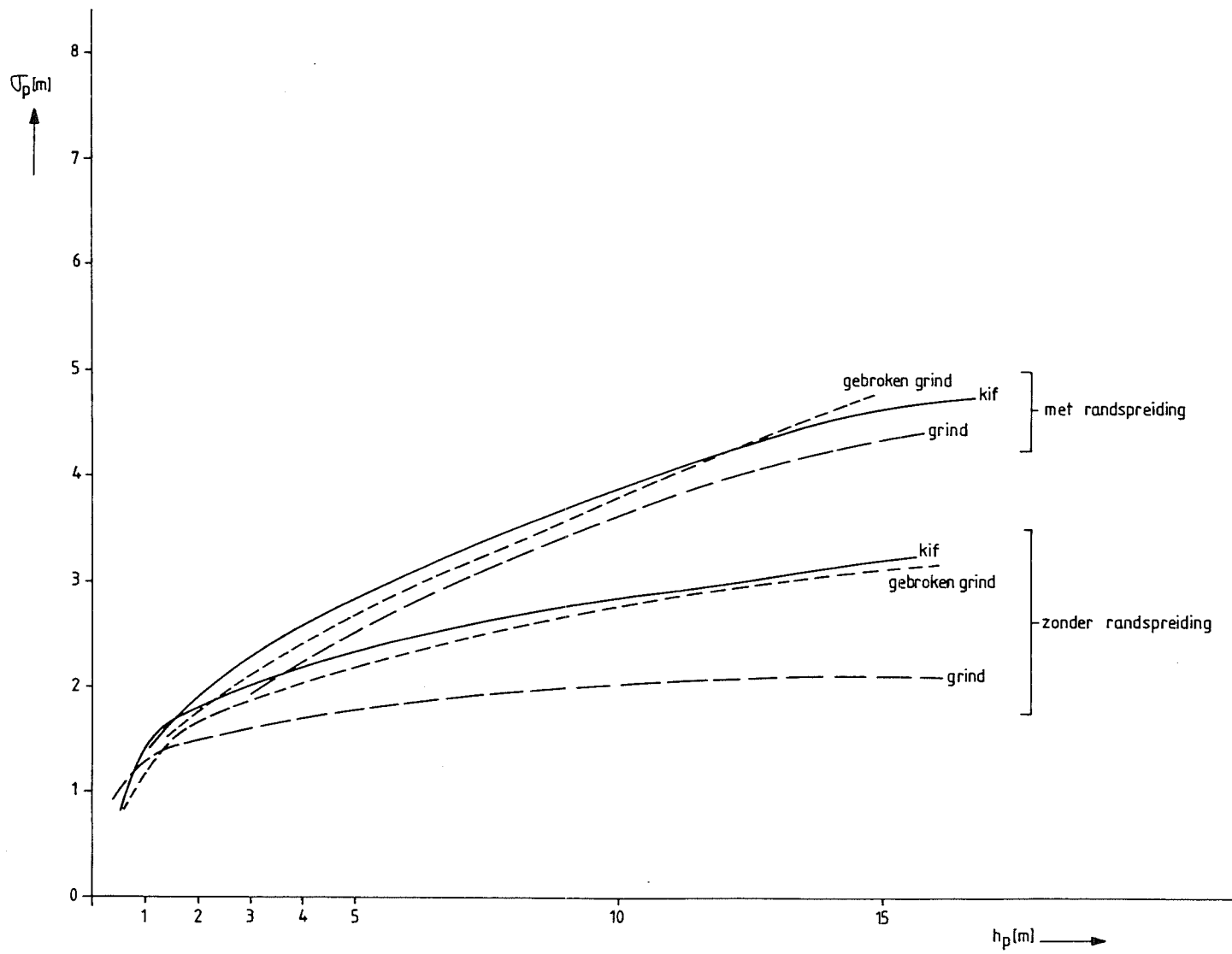
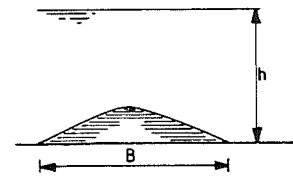
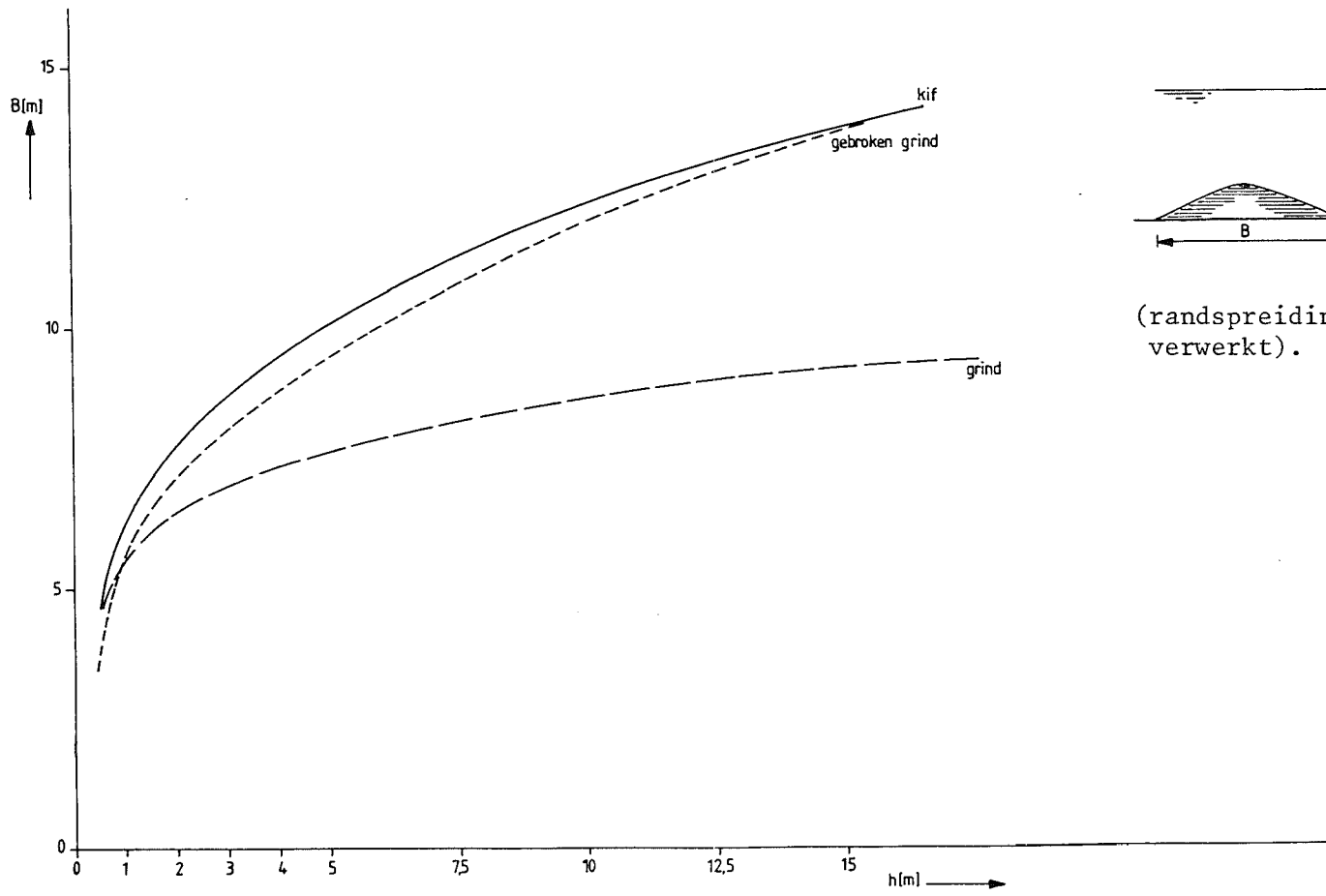
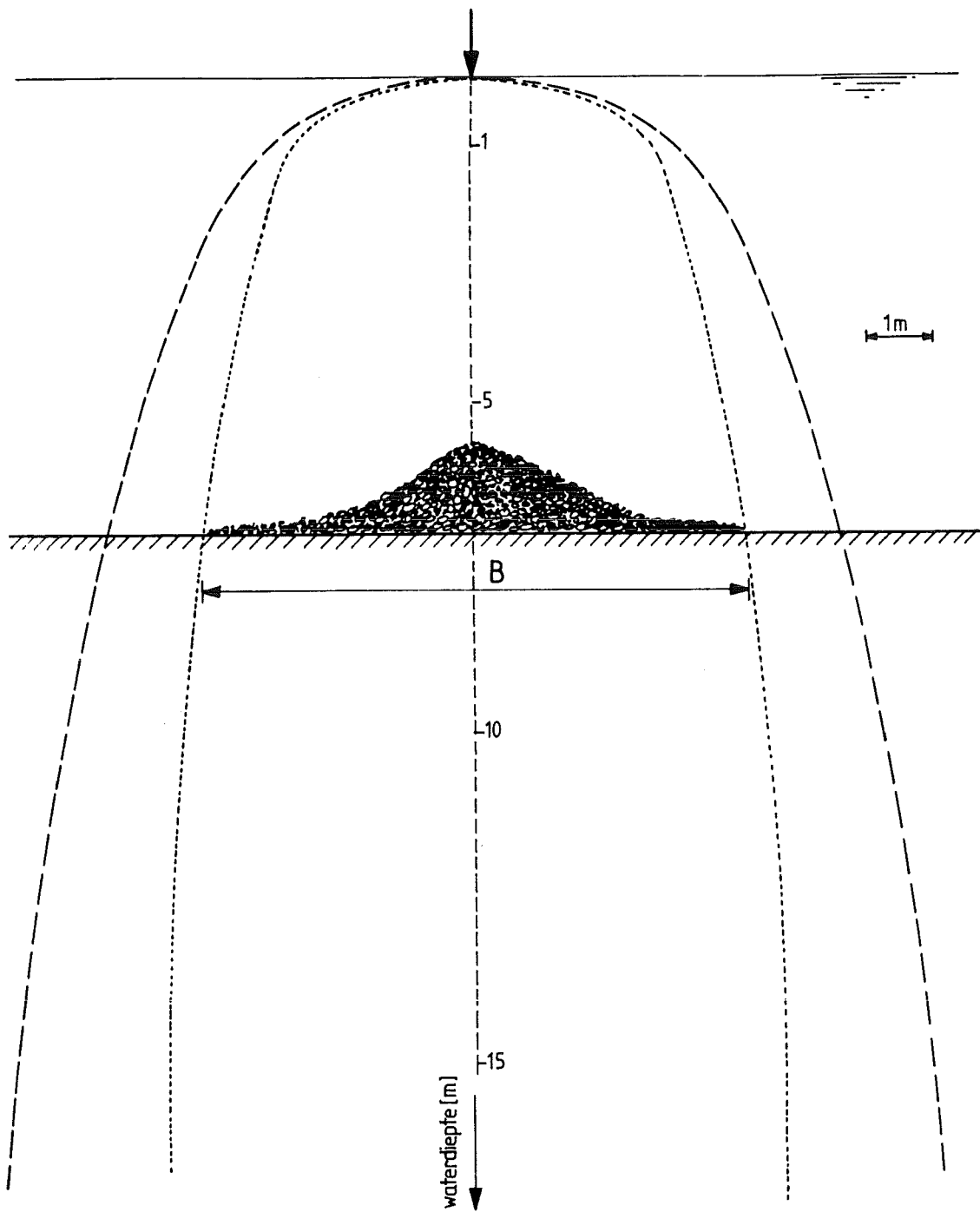


fig. 26



(randspreiding niet verwerkt).

fig. 27



begrenzing gestorte profiel (B) volgend uit
 modelproeven met kif, 4-6 mm.

begrenzing gestorte profiel (B) volgend uit
 modelproeven met willekeurig grind, 8-11 mm.

fig. 28

Fotobijlage