



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

stroombestendigheid van de drempel
tijdens de bouwfase

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 1974

juli 1984

stormvloedkering Oosterschelde

stroombestendigheid van de drempel
tijdens de bouwfase

verslag modelonderzoek

M 1974

juli 1984

INHOUD

blz.

1.	<u>Inleiding</u>	1
1.1	Doelstelling.....	1
1.2	Voorgeschiedenis.....	1
1.3	Opdracht en uitvoering.....	1
2.	<u>Conclusies</u>	3
3.	<u>Probleemstelling</u>	5
3.1	Algemeen.....	5
3.2	Stand van zaken bij het begin van het onderzoek.....	6
3.3	Onderzoeksaspecten.....	7
4.	<u>Opzet van het onderzoek</u>	9
4.1	Proefopstelling.....	9
4.2	Meetmethoden.....	10
4.3	Proevenprogramma.....	11
5.	<u>Resultaten</u>	12
5.1	Bepaling kritieke aanstroomsnelheid zonder pijlers.....	12
5.2	Bepaling kritieke aanstroomsnelheid met pijlers.....	14
5.3	Bepaling invloedsfactoren voor de drempel.....	15
5.4	Overige metingen.....	19
6.	<u>Kwantitatieve aspecten</u>	24
6.1	Tijdschalen.....	24
6.2	Transportrelatie.....	26

LITERATUUR

TABELLEN

TABELLEN

- 1 Proevenprogramma
- 2 T2...T8 Resultaten metingen
- 3 T1...T8 Overzicht k-factoren
- 4 T1...T14 Stroomsnelheidsmetingen

FIGUREN

- 1 Invloedsfactoren van de pijler en de verdieping volgens M 1524
- 2 Invloedsfactoren voor scheve aanstroming en golven volgens M 1524

- 3 Overzicht Pentagoot
- 4 Proefopstelling
- 5 Invloedsfactoren
- 6 Opgetreden golfhoogten
- 7 Begin van beweging
- 8 Relatie schade-kuildiepte

FOTO'S

- 1 Overzicht stromend model
- 2 Overzicht model met verdieping van 10 m

T2

- 3 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,08$ m/s
- 4 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,41$ m/s
- 5 Opbouwfase 3, $u_A = 1,75$ m/s
- 6 Opbouwfase 3, $u_A = 2,25$ m/s

T3

- 7 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,95$ m/s
- 8 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 3,23$ m/s
- 9 Opbouwfase 3, $u_A = 2,70$ m/s
- 10 Opbouwfase 3, $u_A = 3,16$ m/s

T4

- 11 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 1,71$ m/s
- 12 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,28$ m/s
- 13 Opbouwfase 3, $u_A = 1,72$ m/s
- 14 Opbouwfase 3, $u_A = 3,30$ m/s

T5

- 15 Opbouwfase 3, $u_A = 1,77$ m/s
- 16 Opbouwfase 3, $u_A = 2,12$ m/s

T6

- 17 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,72$ m/s
- 18 Opbouwfase 3, $u_A = 2,83$ m/s

T7

- 19 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 1,75$ m/s
- 20 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 2,42$ m/s

T8

- 21 Opbouwfase 1 en 2, $u_A = 3,30$ m/s
- 22 Opbouwfase 3, $u_A = 3,18$ m/s

FOTO'S (vervolg)

23 T9 Bepaling k_8 , $u_A = 2,96$ m/s

24 T11 Bestorting vak 1, $u_A = 2,91$ m/s

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

Stroombestendigheid van de drempel tijdens de bouwfase

1. Inleiding

1.1 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is een bijdrage te leveren aan de ontwerpmethodiek van de te bouwen drempel van de Stormvloedkering in de Oosterschelde. Nadat de pijlers geplaatst zijn, wordt de drempel gebouwd. De drempel bestaat uit een aantal lagen (bouwfasen), waarvan de omvang en samenstelling ondermeer afhankelijk zijn van de belasting tijdens de bouw. De belasting wordt voornamelijk gevormd door stroom- en golfaanval en is gerelateerd aan de uitvoeringsmethodiek en aan de voorspellingsmethodiek van stroomsnelheid en golven. Nota DREM-M-83115 van de Rijkswaterstaat geeft een beschrijving van deze problematiek.

De bijdrage van het hier beschreven onderzoek bevat de bestudering van de relatie tussen de stroomsnelheid en golven en de stabiliteit van de drempelmaterialen.

De basis voor het onderzoek is gegeven in de notitie 31 DREM-M83124 van de Rijkswaterstaat.

1.2 Voorgeschiedenis

In het jaar 1978 is de stabiliteit van de drempel tijdens de bouwfase reeds onderwerp van onderzoek geweest. De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in de verslagen M1524 delen I, II en III van augustus 1983 [1,3,7]. De resultaten van het onderzoek M1524 waren zodanig, dat ondanks een aantal ongunstige aannamen en ongunstig geïnterpreteerde proefresultaten een ontwerp van de drempel was te realiseren met behulp van de normaal te leveren steensorteringen.

1.3 Opdracht en uitvoering

In de afgelopen jaren is de voorspellingsmethodiek van de te verwachten stroomsnelheden tijdens de bouw van de Stormvloedkering verder ontwikkeld, met

als resultaat dat de voorspelde stroomsnelheden tijdens de bouwfase van de drempel hoger zijn dan oorspronkelijk werd verwacht. De drempel bleek hierdoor tijdens de bouwfase onvoldoende stabiel te zijn waardoor een nieuw ontwerp, met name in de Schaar en de Roompot, nodig werd. Gezien de grote verschillen tussen de oorspronkelijke en de nu verwachte stroomsnelheden diende de toegepaste relatie tussen de stroomsnelheid en de stabiliteit van de drempelmaterialen nader te worden getoetst en op kwantitatieve aspecten te worden uitgebreid.

Opdracht tot het uitvoeren van het modelonderzoek is gegeven in brief WT2072 d.d. 20 september 1983 van de Deltadienst van Rijkswaterstaat. Het onderzoek maakt deel uit van het project F7722 S00 van de Hoofdafdeling Waterloopkunde. Het onderzoek werd uitgevoerd in de Pentagoot van het Laboratorium De Voorst en stond onder leiding van ing. J.J. Taat. Van de zijde van de Hoofdafdeling Waterloopkunde werd het onderzoek begeleid door ir. M.R. van der Does de Bye.

2. Conclusies

Ten aanzien van de invloedsfactoren voor de stabiliteit van de drempelmaterialen zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Het onderzoek heeft geleid tot een aanzienlijke verbetering van het inzicht in de relatie tussen de stroomsnelheid en golven en de stabiliteit van de drempelmaterialen.
2. De grootte van de invloedsfactoren wijkt in principe niet sterk af van de in eerder onderzoek (M1524) bepaalde grootte. Door een betere definiëring van schadekriteria en het bestuderen en oplossen van onduidelijkheden die reeds bij het onderzoek M1524 waren gesignaleerd is een meer consistent resultaat verkregen.
3. De invloedsfactoren zijn gerelateerd aan een ongestoorde kritieke aanstroomsnelheid waarvoor geldt $\psi \approx 0,04$.
4. De invloedsfactor voor de stroming rond de pijler (k_4) is afhankelijk van de waterdiepte en is omgekeerd evenredig met de hoogte van de opbouwfase.
5. De invloedsfactor voor stroming ter plaatse van de verdieping (k_2) is sterk afhankelijk van de waterdiepte en onafhankelijk van de opbouwfase. Bij waterdiepten groter dan 25 m is de invloed nihil, bij kleinere waterdiepten neemt de invloed sterk toe.
6. De invloedsfactor voor scheve aanstroming (k_6) is klein en vrijwel onafhankelijk van de opbouwfase en de waterdiepte.
7. De invloedsfactor voor golven (k_7) is klein en vrijwel onafhankelijk van de opbouwfase en waarschijnlijk ook vrijwel onafhankelijk van de waterdiepte (waterdiepte > 20 m).
8. Het gehanteerde superpositie-beginsel voor de invloedsfactoren is toelaatbaar.
9. Bij overschrijding van de kritieke aanstroomsnelheid neemt de schade in

grootte zeer snel toe, het gebied waar schade optreedt, blijft echter beperkt tot de omgeving van de bovenstroomse kop van de pijler.

10. Tengevolge van een ongunstige stroming rond de kop van de pijler is een opbouwphase waarbij de bovenkant van de bestorting op dezelfde hoogte ligt als de bovenkant van de voetplaat van de pijler ongunstig voor de stabiliteit van de bestorting. Deze opbouwphase (1) kan beter vermeden worden.

Ten aanzien van de overige proefresultaten zijn de volgende conclusies te trekken:

11. Een invloedsfaktor voor de overgangskonstruktie (k_g) is moeilijk te definiëren. De grootte van de invloedsfaktor is sterk afhankelijk van de afstand benedenstrooms van de pijlers, de afstand ten opzichte van de zijkant van de pijlers en de grootte van de verdieping. Afhankelijk van een meer of minder gunstige situatie varieert de grootte van de invloedsfaktor van 1 tot 1,5.
12. Uit het oogpunt van de stabiliteit van uitvullaag en onderlaag is de meest gewenste stortvolgorde die, waarbij het vak tussen de pijlers het laatst wordt gestort. Dit vak is tengevolge van de sterke stroomaanval naast de bovenstroomse kop van de pijler het minst stabiel.

3. Probleemstelling

3.1 Algemeen

De drempel wordt in fasen opgebouwd uit lagen stortsteen. De geometrie van de opbouwfasen is gegeven in figuur 83-4-048 van de Deltadienst. De samenstelling van de lagen is afhankelijk van geometrie en natuurrandvoorwaarden. In het onderzoek is de relatie bestudeerd tussen de stroomsnelheid en de stabiliteit van de drempelstenen bij verschillende geometrieën. Gekombineerd met de natuurrandvoorwaarden, planningsaspecten en vereiste veiligheden kan met behulp van de in het onderzoek vastgestelde relaties een definitief ontwerp gerealiseerd worden.

De in het onderzoek onderzochte relaties voor de stroombestendigheid van de drempelmaterialen tijdens de opbouwfasen is dezelfde als in het onderzoek M1524 is ontwikkeld:

$$u_k = \frac{u_{ok}}{k_1 \dots k_7} \quad (1)$$

waarin:

u_{ok} = kritieke aanstroomsnelheid bij ongestoorde stroming
(geen pijler geplaatst) (m/s)

u_k = kritieke aanstroomsnelheid (met pijler aanwezig) (m/s)

$k_1 \dots k_7$ = diverse invloedsfactoren (-)

k_1 = Invloed van de stroomvertraging door de geometrische vergroting van het doorstroomprofiel ten gevolge van een verdieping (inbaggering)

k_2 = Korrektiefactor van k_1 voor het in rekening brengen van vervorming van het stroombeeld (stroomloslating en dergelijke) en verhoging van de turbulentie-intensiteit van de stroming bij vergroting van het doorstroomprofiel bij een verdieping.

k_3 = Invloed van de geometrische verkleining van het doorstroomprofiel door de aanwezigheid van de pijler en de reeds aangebrachte drempellagen.

- k_4 = Korrektiefactor van k_3 voor het in rekening brengen van de verstoring van het plaatselijke stroombeeld door de pijler en reeds aangebrachte drempellagen. De mate van stroomlijning van pijler en drempellagen is hierbij bepalend (vergelijk: bij ideale stroomlijning zou $k_4 = 1$ zijn).
- k_5 = Invloed van de aanwezigheid van een bouwfront ten opzichte van de tweedimensionale situatie.
- k_6 = Invloed van scheve ten opzichte van rechte aanstroming.
- k_7 = Invloed van additionele golfwerking (stroming plus golven ten opzichte van alleen stroming).

Aansluitend bij de door de Rijkswaterstaat gehanteerde definities zijn voor de diverse k-waarden reciproke waarden genomen ten opzichte van de definitie zoals die bij het onderzoek M1524 zijn gebruikt.

3.2 Stand van zaken bij het begin van het onderzoek

Zoals eerder vermeld is het onderzoek een voortzetting van het onderzoek M1524. Het is zinvol een korte samenvatting te geven van de stand van zaken op het moment dat met het vervolgonderzoek werd aangevangen.

Het onderzoek M1524 heeft zich beziggehouden met de bepaling van de grootte van de k-factoren ($k_1 \dots k_7$). Van belang zijn alleen de factoren k_4 , k_2 , k_5 , k_6 en k_7 de factoren k_1 en k_3 worden bepaald door de geometrie (doorstroomprofiel).

- k_4 Figuur 1 geeft hiervan een overzicht. Uit de figuur blijkt dat de opbouwfasen a, c en d ongeveer eenzelfde k-waarde hebben, maar dat opbouwphase b een niet logische afwijking vertoont.
- k_2 In figuur 1 is te zien dat het beeld van k_2 weinig consistent is. De oorzaak hiervoor is vermoedelijk de spreiding in de meetresultaten en de geringe onderlinge verschillen.
- k_5 Uit de tabel in figuur 1 is geconcludeerd dat een bouwfront geen invloed heeft ($k_5 = 1$). De enigszins afwijkende grootte van k_5 bij opbouwphase a is verwaarloosd.
- k_6 De invloed van de scheve aanstroming is volgens figuur 2 gering met uitzondering van opbouwphase b. Voor deze sterk afwijkende grootte van k_6 is

als verklaring gegeven dat de bovenkant van de voetplaat van de pijler gelijk lag met de bovenkant van de bestorting, dit zou een sterk negatieve invloed hebben op de stabiliteit van de bestorting.

- k_7 Uit figuur 2 blijkt dat de invloed van golven bij sommige opbouwfasen aanzienlijk is en bij andere gering. De grootste invloed is te vinden bij opbouwfase c, terwijl opbouwfase d een kleinere invloed ondervindt evenals opbouwfasen a en b bij $\beta = 15^\circ$. De consistentie laat te wensen over, waarvoor geen verklaring is.

Resumerend zijn ten aanzien van de k-factoren de volgende vragen open gebleven na het onderzoek M1524:

- k_4 . De grootte bij opbouwfase b
- k_2 . De consistentie
- k_6 . De grootte bij opbouwfase b
- k_7 . De consistentie.

Behalve de grootte van de k-factoren waren er nog enkele vragen of aannamen niet beantwoord of getoetst:

- de toegepaste superpositie van de k-factoren
- de konsekventies van het overschrijden van de kritieke aanstroomsnelheid (kwantitatieve aspecten)
- de definiëring van de kritieke aanstroomsnelheid bij ongestoorde stroom en de invloed hiervan op de k-factoren ($u_{ok} = f(C, \psi)$; $k = f(\psi)$).

3.3 Onderzoeksaspecten

Het onderzoek is gericht op het bepalen van de volgende aspecten:

- De grootte en consistentie van de factoren k_4 , k_2 , k_6 en k_7
- De geldigheid van de toegepaste superpositie
- De konsekventie van het overschrijden van de kritieke aanstroomsnelheid
- Een k-factor voor de overgangskonstruktie
- De stortvolgorde bij het aanbrengen van uitvullaag en afdeklaag
- Stroomsnelheidsverdelingen nabij de koppen van de pijlers en tussen de pijlers ten behoeve van de uitvoering.

De laatste drie aspecten staan feitelijk los van het onderzoek naar de stabiliteit van de drempel, gezien vanuit het oogpunt van de ontwerpmethodiek.

Behalve ontworpen worden, moet de drempel echter ook worden gebouwd, zodat deze aspecten in het aanwezige model meegenomen konden worden ten behoeve van de uitvoering.

De k-faktor voor de overgangskonstruktie (k_g) staat los van de k-factoren van de drempel en is een maat voor de stabiliteit van de bestortingen buiten het drempelgebied voordat met de bouw van de drempel wordt begonnen.

De stortvolgorde van uitvullaag en afdeklaag is onderzocht teneinde criteria te kunnen leveren die van invloed zijn op de planning voor de uitvoering. Gekeken is in hoeverre er keuzevrijheid is in de stortvolgorde, voorzover het de stabiliteit betreft.

Ten behoeve van het manoeuvreren met schepen zijn op een aantal lokaties stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd met het doel het inzicht in gedetailleerde snelheidsverdelingen nabij de pijlers te vergroten.

4. Opzet van het onderzoek

4.1 Proefopstelling

Het onderzoek M1524 is uitgevoerd in de Tussenpadgoot (2-dimensionaal) en in de Golfbak (3-dimensionaal). In de Tussenpadgoot is de invloed van de verdieping onderzocht, het inbouwen van verdiepingen in de Golfbak werd als te tijdrovend beschouwd. Ten gevolge van deze opzet was controle van de toegepaste superpositie niet mogelijk. Voor het onderhavige onderzoek was het dus noodzakelijk over een 3-dimensionale proefopstelling te beschikken waarbij ook de invloed van een verdieping onderzocht zou kunnen worden. Teneinde dit schaalmodel enigszins handelbaar te houden was een minimaal aantal pijlers gewenst. Combinatie met de noodzaak (regelmatige) golven te kunnen opwekken, gaf de doorslag voor de keuze van de Pentagoot (figuur 3).

Aangezien pijlers met een lengteschaalfactor 30 beschikbaar waren, is deze schaal voor het onderzoek toegepast. Hierdoor konden 3 doorstroomopeningen in het model gerealiseerd worden, de gootbreedte (150 m prototype) was echter zodanig dat kleine delen van de naastliggende doorstroomopeningen eveneens in het model gereproduceerd moesten worden. De pijlers aan de zijkanten van de goot waren dientengevolge ook iets groter dan halve pijlers (figuur 4 en foto 1 en 2).

De filtermatten werden gereproduceerd door multiplexplaten, de bestorting van de negatieve overlap was van hout gemaakt, beplakt met steentjes om de ruwheid na te bootsen. In de goot is een verdiept gedeelte aanwezig, waardoor de verdieping zonder brekerij gerealiseerd kon worden. Het bestortingsmateriaal is niet op schaal gereproduceerd. Gekozen is voor één diameter waarvan de grootte werd bepaald door de wens geen invloed te hebben van schaaleardeffecten op de stabiliteit (viskositeitsinvloed). Gezien het beschikbare debiet ($2 \text{ m}^3/\text{s}$ model) en de te reproduceren waterdiepte (25 m prototype) is gekozen voor een diameter van 5 à 6 mm in het model (foto 2). Bij deze diameter is de kans op viskositeitsinvloeden gering, terwijl de maximaal instelbare stroomsnelheid groot genoeg is om bij aanwezigheid van de pijlers schade te kunnen realiseren ($u_{\text{omax}} = 2,6 \text{ m/s}$ prototype).

Alleen de bepaling van de kritieke aanstroomsnelheid zonder pijlers (u_{ok}) is gezien het beschikbare debiet problematisch.

De aanstroomsnelheden zijn gemeten met een Ott-molen (meetpunt A, figuur 4), terwijl in een aantal gevallen gebruik gemaakt is van een micromolen. De

waterstanden zijn bepaald met behulp van peilnaalden.

De lokaties van de uitgevoerde stroomsnelheidsmetingen zijn gegeven in figuur 4. In deze figuur is tevens aangegeven op welke lokaties (1) de schade is bepaald. De lokaties 11 en 16 zijn niet gebruikt wegens de te verwachten wandinvloeden en afwijkende pijler vormen van de pijlers bij de gootwanden.

4.2 Meetmethoden

Voor het bepalen van de factoren k_4 , k_2 , k_6 en k_7 zijn de lokaties 2...5 van belang. Deze lokaties zijn uitgevoerd in zones met verschillend gekleurde stenen. Na het instellen van een gewenste stroomsnelheid werd deze snelheid in alle gevallen gedurende 0,5 uur gehandhaafd. Hierna werd per zone de hoeveelheid schade (kg) bepaald door weging van de verplaatste (gekleurde) stenen. In alle onderzochte situaties zijn een aantal verschillende aanstroomsnelheden ingesteld, zodat per situatie en per lokatie de relatie tussen de stroomsnelheid en de schade bekend is (voorbeeld: foto's 3 en 4). De bij een stroomsnelheid opgetrede schade werd uit het model gehaald om de massa te bepalen en niet teruggelegd. De in de tabellen gepresenteerde schade is de gesommeerde schade tot en met de betreffende snelheidstap. De bepaling van de schade in de overige gevallen (overgangskonstructie, stortvolgorde bij uitvullaag en afdeklaag) is in principe op dezelfde wijze uitgevoerd.

De gemiddelde aanstroomsnelheid is bepaald uit debietmeting (Romijnstuw) en een snelheidsvertikaal (meetpunt A). Uit de gemeten snelheidsvertikaal werd de gemiddelde stroomsnelheid bepaald, deze werd gecontroleerd met behulp van de gemiddelde stroomsnelheid uit het debiet.

Definiëring van de kritieke aanstroomsnelheid (u_k)

Bij het onderzoek M1524 zijn twee verschillende definities toegepast. In de Tussenpadgoot is voor de definiering van de kritieke aanstroomsnelheid als schadekriterium een kuiltje van ca. 0,5 m diepte naast de bovenstroomse kop van de pijler aangehouden (schade ca. 2000 kg). Dit kuiltje kon door de glazen wand van de goot en het heldere water worden waargenomen en gemeten. In de Golfbak, waarbij met zeer troebel buitenwater werd gestroomd, is gebruik gemaakt van vakken met gekleurde steentjes. Het aantal uit de vakken verplaatste stenen was een maat voor het vaststellen van de schade. De kritieke aanstroomsnelheid werd gedefinieerd bij een schade van 25 stenen in één zone (afhankelijk van de diameter 250-2500 kg).

Voor het huidige onderzoek was het gewenst een éénduidig criterium aan te leggen. Omdat in de Pentagoot gestroomd werd met buitenwater is hier gebruik gemaakt van verplaatste massa in plaats van aantallen stenen, waardoor ook grotere schade's onderzocht konden worden.

Enigszins arbitrair is als schadekriterium gekozen een massa van 2025 kg, hetgeen overeenkomt met een kuildiepte van ca. 0,5 m.

4.3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma is afgeleid uit de in hoofdstuk 3 vermelde onderzoeksaspecten en is gegeven in tabel 1.

Begonnen is (T1) met het bepalen van de kritieke aanstroomsnelheid zonder de aanwezigheid van de pijler (u_{ok}), waarna de diverse factoren voor de drempel zijn onderzocht, T2...T6. Met twee proeven, T7 en T8, is de toelaatbaarheid van de toegepaste superpositie onderzocht. De stabiliteit van de overgangskonstructie is zonder en met verdieping onderzocht (T9, T10), terwijl bij de proeven T11...T14 verschillende volgorden bij het storten van uitvullaag en afdeklaag zijn onderzocht. Op een aantal plaatsen (figuur 4) zijn tijdens het onderzoek bij verschillende situaties stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd (meetpunten A...I, K).

5. Resultaten

5.1 Bepaling kritieke aanstroomsnelheid zonder pijlers

De kritieke aanstroomsnelheid bij afwezigheid van de pijlers wordt in principe bepaald met de relaties:

$$u_{ok} = u_{*k} \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (2)$$

$$u_{*k} = \sqrt{\psi \Delta g D} \quad (3)$$

$$C = 18 \log \frac{12 h}{2D} \quad (4)$$

waarin:

u_{*k} = kritieke schuifspanningssnelheid (m/s)

C = ruwheidswaarde van De Chézy ($m^{1/2}/s$)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

ψ = transportparameter van Shields (-)

Δ = relatieve dichtheid (-)

D = diameter steen (D_{50}) (m)

h = waterdiepte ten opzichte van de onderkant van de voetplaat van de pijler (m)

In het onderzoek M1524 is uit de gemeten u_{ok} een ψ berekend, waarbij bij u_{ok} "enig" transport optrad ($\psi = 0,045$).

De grootte van ψ werkt door in de grootte van de faktor k_4 ; een kleinere waarde van ψ betekent een kleinere waarde van u_{ok} ($u_{ok} :: \sqrt{\psi}$ en $k_4 :: \frac{u_{ok}}{u_k}$). De relaties gelden echter alleen voor een volledig aan de ruwheid van de bodem aangepaste snelheids- en turbulentievertikaal, bij de onderzochte geometrie is hiervan echter geen sprake. De gevonden waarde van $\psi = 0,045$ bij het onderzoek M1524 is derhalve enigszins discutabel.

Teneinde de k_4 -faktor op dezelfde wijze te bepalen als bij M1524 was het noodzakelijk u_{ok} te definiëren bij $\psi = 0,045$.

Om ψ te bepalen zijn de volgende methoden toegepast.

a. In het model is de stroomsnelheid bepaald waarbij net begin van transport optrad ($u = 3,01$ m/s). Dit werd beschouwd als transport bij criterium 1,

- waarbij $\psi \approx 0,029$ (begin van beweging volgens W.L., figuur 7). Onder aanname van afwezigheid van viskositeitsinvloed geldt, dat $\psi = 0,045$ optreedt bij een stroomsnelheid die ca. 25% groter is dan bij criterium 1. Deze snelheid is in het model aangehouden als u_{ok} ($= 3,75$ m/s).
- b. Bij deze stroomsnelheid is een transportmeting uitgevoerd (teneinde deze stroomsnelheid te kunnen bereiken, werd de waterdiepte verkleind). Verwerking hiervan via Paintal [8] geeft als resultaat $\psi = 0,038$.
- c. Uit een aantal snelheidsvertikalen is bij u_{ok} een stroomsnelheid bepaald op 2 m hoogte boven de bodem. Uitgaande van de gedachte dat deze stroomsnelheid maatgevend is voor het transport, is bij deze stroomsnelheid de u_* bepaald met behulp van de relaties (2), (3) en (4), waarbij voor $h = 6$ m is aangehouden. Hierbij is dus uitgegaan van de veronderstelling dat alleen het onderste deel van de vertikaal maatgevend is voor de stabiliteit, de waarde $h = 6$ m is arbitrair. Het resultaat is $\psi = 0,035$.

Het feit dat de gemiddelde stroomsnelheid in de Pentagoot ten gevolge van de geringe aanstroamlengte onbruikbaar is voor het bepalen van ψ wordt aangetoond door de uitkomst $\psi = 0,02$. Bij deze waarde van ψ treedt volgens figuur 7 geen transport op.

Uit a...c kan worden gekonkludeerd dat $0,035 < \psi < 0,045$. De waarde van ψ , kan gezien de nauwkeurigheden van de verschillende methoden gesteld worden op ca. 0,04.

In het onderzoek is uit praktische overwegingen (beschikbaarheid) gebruik gemaakt van twee, vrijwel gelijke, materialen. De kritieke aanstroomsnelheid van het tweede materiaal is berekend met de formules (2), (3) en (4), uitgaande van de gevonden waarden bij proef T1. De kritieke aanstroomsnelheid van dit materiaal bedroeg 3,49 m/s. De berekening is gecontroleerd door een meting met het tweede materiaal via de faktor k_4 ($u_{ok} :: k_4 \cdot u_k$, u_k gemeten, k_4 bekend).

De aanname dat viskositeitseffekten geen grote rol spelen, is als volgt getoetst.

De invloed van de viskositeit wordt bepaald door de grootte van het getal van Reynolds, betrokken op de steendiameter.

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$$

waarin:

- u_* = schuifspanningssnelheid (m/s)
 D = diameter steen (D_{50}) (m)
 ν = kinematische viscositeit (m^2/s)

Uit relatie (2) is u_* te bepalen voor proef T1.

$$u_* = \sqrt{\psi \Delta g D} = (0,04 \cdot 1,6 \cdot 9,8 \cdot 0,0055)^{0,5} = 0,059 \text{ m/s}$$

waaruit volgt

$$Re_* = \frac{0,059 \cdot 0,0055}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 294 \quad (\text{prototype } Re_* \approx 50000)$$

Aangezien viscositeitsinvloed te verwachten is indien $Re_* < 576$ treedt deze dus op. De grootte van de daardoor geïntroduceerde fout in de kritieke aanstroomsnelheid is op grond van figuur 7 echter slechts 3% ($(\frac{0,043}{0,04})^{0,5} \cdot 100$) en derhalve te verwaarlozen.

5.2 Bepaling kritieke aanstroomsnelheid met pijlers

In hoofdstuk 4 is het criterium voor de kritieke aanstroomsnelheid aangegeven. Voor het bepalen van de kritieke aanstroomsnelheid kon gekozen worden uit twee methoden:

1. per proef wordt de relatie $S(\text{chade}) :: u^a$ bepaald, waaruit u_k kan worden afgeleid
2. na alle proeven wordt de relatie $S(\text{chade}) :: u^a$ bepaald, waarbij a wordt gemiddeld over (min of meer) alle proeven.

De tweede methode heeft als voordeel dat een meer consistent geheel ontstaat maar houdt het gevaar in dat bij werkelijk afwijkend schadegedrag dit niet herkenbaar blijft. Analyse van de resultaten toont aan dat a nogal fluctueert en dat dit niet gekoppeld kan worden aan verschijnselen (geometrieën). De variatie van a wordt toegeschreven aan onnauwkeurigheden van het onderzoek, en gekozen is voor methode 2, met $a = 12,5$ (tabel 2).

Uitgaande van $S = c u_k^{12,5}$ kan nu per ingestelde stroomsnelheid de waarde van de constante c bepaald worden en per proef kunnen de gevonden waarden worden

gemiddeld. De kritieke stroomsnelheid kan na invulling van $S = 2025$ kg worden bepaald.

5.3 Bepaling invloedsfactoren voor de drempel

Invloedsfaktor voor de aanwezigheid van de pijler (k_4 , proef T2)

De proefresultaten worden gegeven in tabel 2 en de foto's 3...6. Een niet opgelost probleem in M1524 was de afwijkende waarde van de opbouwphase b. Bovendien bleek bij controle van de faktor k_3 , dat deze faktor voor opbouwphase d niet geheel juist was. De gegevens van M1524 zijn met de resultaten van het onderhavige onderzoek in figuur 5 verzameld.

De resultaten van proef T2 geven een logisch verband van k_4 te zien. Hogere opbouwfasen geven een gunstiger grootte van k_4 . Bij hogere opbouwfasen wordt het aangestroomde pijleroppervlak steeds kleiner waardoor een gunstiger stroombeeld ontstaat rondom de pijler. Foto 5 toont dat de plaats van de aantasting direkt naast en op de hoekpunten van de aangestroomde kopse kant van de pijler is gelegen. Uit figuur 5 blijkt dat de relatie tussen de hoogte van de opbouwphase en de grootte van k_4 vrijwel lineair is. Voor het berekenen van de overige k-factoren zijn voor de opbouwfasen 1 en 2 de uitkomsten van proef T2 gebruikt. Voor opbouwphase 3 was de afwijking ten opzichte van de gevonden verbanden te groot, zodat voor verdere berekening $k_4 = 1,3$ is aangehouden (zie ook tabel 3).

De gunstige waarde van k_4 bij afnemende waterdiepte kan voor een klein deel verklaard worden doordat k_3 feitelijk onjuist is gedefinieerd. Aangezien de schade altijd ontstaat naast de kop van de pijler is eigenlijk het doorstroomprofiel ter plaatse van de kop maatgevend. Toegepast is echter het doorstroomprofiel met de grootste pijlerdoorsnede. Een betere definiëring van het doorstroomprofiel zou bij lagere waterstanden een relatief iets minder sterke toename van k_3 veroorzaken, waardoor k_4 minder snel afneemt. Het grootste deel van de invloed van de waterdiepte wordt hier echter niet door verklaard, verondersteld kan worden dat bij grotere vernauwing (grotere k_3) het stroombeeld iets gunstiger wordt door bijvoorbeeld minder ver uitwaaiierende werfels, waardoor k_4 (stroombeeldinvloed) iets kleiner wordt.

De afwijkende waarde van opbouwphase b (M1524) bleek te kunnen worden verklaard door het schadegedrag met de bijbehorende definities van schade. Bij de proeven in de Tussenpadgoot was het schadekriterium een kuiltje van ca. 0,5 m,

er onstaat echter transport langs de rand van de voetplaat aangezien het oppervlak van de bestorting ongeveer dezelfde hoogte heeft als de bovenkant van de voetplaat van de pijler. Dit betekent dat reeds transport heeft plaats gehad voordat een kuiltje wordt gevormd, hetgeen een gunstiger k_4 tot gevolg heeft (voetplaat beschermt als het ware de bestorting omdat de voetplaat er feitelijk een onderdeel van vormt). Door de in dit onderzoek gebruikte definitie speelt de afmeting van de kuil geen rol, doch alleen het gewicht van de verplaatste stenen.

De faktor k_4 kan in formulevorm worden benaderd door:

$$k_4 = 1,31 + 0,0084 h - 0,034 d_r$$

$$20 < h < 40$$

$$d_r < 16$$

waarin:

$$h = \text{waterdiepte} \quad (\text{m})$$

$$d_r = \text{hoogte van de drempel} \quad (\text{m})$$

Konklusie:

opbouwfase 1: k_4 is ca. 9% groter dan bij opbouwfase b van M 1524, en komt overeen met de waarden van opbouwfasen a en c bij M 1524

opbouwfase 2: k_4 is iets groter dan bij M 1524, ca. 2%

opbouwfase 3: k_4 sluit goed aan bij de (met een gecorrigeerde k_3) waarde van opbouwfase d van M 1524.

Op grond van het bovenstaande kan worden gesteld, dat het onderzoek M 1974 de resultaten van het onderzoek M 1524 bevestigt. Het probleem bij opbouwfase b is opgelost, een logisch verband tussen de opbouwfasen 1, 2 en 3 is gevonden. Dit houdt tevens in, dat de waarden van ϕ in relatie tot u_{ok} tussen de onderzoeken M 1974 en M 1524 goed overeenkomen.

Invloedsfaktor voor de invloed van de verdieping (k_2 , proeven T3 en T6)

De resultaten van het huidige onderzoek en de resultaten van M 1524 zijn gegeven in figuur 5. Uit de resultaten van M 1524 bleek dat k_2 toenam met afnemende waterdiepte. In eerste instantie is alleen de standaard waterdiepte van 25 m onderzocht (foto's 7...10). De faktor k_2 bleek gelijk te zijn aan de

in het onderzoek M 1524 gevonden k_2 bij 38 m (circa 1). Door dit resultaat was het nodig te controleren of tussen de waterdiepten 25 en 20 m er een omslagpunt is, of dat het resultaat van M 1524 bij een waterdiepte van 20 m niet juist was. Uit het resultaat van proef T6 (foto's 17 en 18) blijkt dat er inderdaad een omslagpunt is, waardoor de waarde van k_2 bij waterdiepten < 25 m ongunstig wordt. Blijkbaar laat de stroom bij deze waterdiepten los waardoor een neer op het talud ontstaat. Bij de pijler ligt de stroom weer aan op de bodem, echter met een hoge turbulentie-intensiteit. Het lijkt waarschijnlijk dat voor een nog kleinere waterdiepte niet een nog ongunstiger waarde van k_2 zal optreden.

In het huidige onderzoek is geen verdieping van 5 m onderzocht. De in figuur 5 gegeven relatie van k_2 bij een verdieping van 5 m is afgeleid uit het onderzoek M 1524 en geïnterpreteerd met het huidige inzicht.

Konklusie:

De resultaten van de onderzoeken M 1974 en M 1524 sluiten goed bij elkaar aan. Er is geen verband tussen de grootte van k_2 en de hoogte van de opbouwfasen. De grootte van k_2 kan geschematiseerd worden als:

$$\begin{aligned}k_2 &= 1 \text{ als } h > 25 \text{ m en } d = 10 \text{ m} \\k_2 &= 1,2 \text{ als } h < 25 \text{ m en } d = 10 \text{ m} \\k_2 &= 1,1 \text{ als } h < 25 \text{ m en } d = 5 \text{ m}\end{aligned}$$

waarin:

h = waterdiepte (m)

d = verdieping (m)

Invloedsfaktor voor scheve aanstroming (k_6 , proef T4)

De invloed van scheve aanstroming was volgens M 1524 gering, met uitzondering van opbouwfase b (figuur 5). Het resultaat van de huidige proeven bevestigt dat de invloed van scheve aanstroming gering is (foto's 11...14). Dit wordt veroorzaakt doordat de stroomlijn van de pijlers gunstiger wordt, hetgeen voor een groot gedeelte de toename van de stroomsnelheid aan één zijde compenseert. Opbouwfase l met een overeenkomstige geometrie als opbouwfase b uit M 1524, geeft nu geen afwijkend resultaat te zien. Evenals bij de faktor k_4 moet de oorzaak gezocht worden in de definiëring van u_k . Bij de proeven ter bepaling van k_6 bij M 1524 (Golfbak) is een (gering) aantal verplaatste stenen als criterium voor u_k gekozen. Gezien het schademechanisme langs de rand van de

bovenkant van de voetplaat van de pijler treedt reeds in een vroeg stadium enig transport op waardoor u_k klein wordt en k_6 dus groot. Doordat in dit onderzoek u_k meer systematisch is gedefinieerd, waarbij ook meerdere metingen een rol spelen, worden de ongewenste gevolgen van dit effect voorkomen.

Konklusie:

Gezien de nauwkeurigheid kan gesteld worden dat k_6 klein is en vrijwel onafhankelijk van de opbouwfase. De faktor k_6 geldt aan één (ongunstige) zijde van de pijler, aan de andere zijde is k_6 vooral bij lagere opbouwfasen, gunstiger.

$$k_6 = 1 + 0,005 \beta \quad \text{als } 0^\circ < \beta < 15^\circ$$

Bepaling invloed van golven (k_7 , proef T5)

De resultaten van het onderzoek M 1524 (figuur 2) zijn niet consistent. Te verwachten zou zijn dat als golven invloed zouden hebben hogere opbouwfasen meer door golven beïnvloed worden dan lagere opbouwfasen. Dit blijkt niet uit de proefresultaten, er is geen logische volgorde. Uit literatuur [5] blijkt dat zonder pijler de golven geen merkbare invloed uitoefenen op de stabiliteit van de drempel (H_s ca. 2 m, $h = 25$ m, $T = 5,4$ s). De in M 1524 gevolgde methode voor het bepalen van de invloed van de waterdiepte op de grootte van k_7 lijkt niet juist te zijn doordat een ander proces de schade bepaalt dan waarvan in de toegepaste literatuur [1] sprake was. De toch gemeten invloed kan alleen verklaard worden door de veronderstelling dat de golven het stromings- en wervelpatroon rond de kop van de pijler ongunstig beïnvloeden. Uit figuur 5 en de foto's 15 en 16 blijkt dat de nu gemeten golfinvloed klein is, terwijl er geen relatie is met de hoogte van de opbouwfasen. Opbouwfase 3 is iets gunstiger dan opbouwfase d van M 1524. Gezien de uitvoering van de proeven, waarbij de aankomende golf redelijk was in te stellen, maar waarbij een zeer onregelmatig golfbeeld bij de pijlers (figuur 6) ontstond door reflecties van de pijlers in combinatie met rechte gootwanden, is spreiding in de proefresultaten verklaarbaar.

Verondersteld kan worden dat bij kleinere waterdiepten k_7 iets ongunstiger wordt door toenemende invloed van de golven op het stromingsbeeld bij de kop van de pijler, bij grotere waterdiepte zal k_7 om dezelfde reden iets gunstiger kunnen zijn. Gezien de grootte van k_7 lijkt nader onderzoek niet zinvol.

Konklusie:

De grootte van k_7 is gering en kan gedefinieerd worden als vrijwel onafhankelijk van de opbouwfase en de waterdiepte.

$k_7 = 1,06$ als $h > 20$ m.

Controle op de toelaatbaarheid van superpositie (proeven T7, T8)

Voor het berekenen van u_k worden alle k-factoren met elkaar vermenigvuldigd, ze zijn echter onafhankelijk van elkaar bepaald. In twee proeven (T7, T8) is het principe van superpositie getoetst.

Bij proef T7 (foto's 19 en 20) is de totale invloed van de aanwezigheid van de pijler, scheve aanstroming en golven onderzocht bij twee opbouwfasen. De gevonden afwijking is gemiddeld + 4,6% (tabel 3).

Bij proef T8 (foto's 21 en 22) is de totale invloed van de aanwezigheid van de pijler, de verdieping en scheve aanstroming onderzocht bij 3 opbouwfasen. De gemiddelde afwijking is -0,6% en is dus te verwaarlozen.

Konklusie:

Superpositie van de invloed van de aanwezigheid van pijler, verdieping, scheve aanstroming en golven is toegestaan.

5.4 Overige metingen

Factoren voor de overgangskonstruktie (k_8 , proeven T9, T10)

De k_8 -faktor heeft betrekking op de stabiliteit van de bestorting benedenstrooms van de pijler, de zogenaamde overgangskonstruktie. De stabiliteit van deze bestorting is onderzocht zonder de aanwezigheid van de drempel. Ten opzichte van de kritieke ongestoorde stroomsnelheid (u_{ok}) is de invloed van de pijler op de stroming van belang ($k_8 = u_{ok}/u_k$), waarbij geldt dat de grootte van k_8 een functie is van de afstand van uit de pijler. Onderzocht zijn drie lokaties: 0, 45 en 90 m achter de pijler, met en zonder verdieping.

De kritieke stroomsnelheid (u_k) is gedefinieerd bij een schade van circa 2000 kg in een gebiedje van ca. 5 m lengte, en een geringe breedte (foto 23), zodat de schade gedefinieerd kan worden als 50 à 100 kg/m² in een beperkt gebied. In tegenstelling tot de eerder onderzochte k-factoren, waar de schade steeds op dezelfde plaats optreedt is dit hier niet het geval, zodat de gegeven k-factoren voorzichtig geïnterpreteerd moeten worden. Een grotere geaccepteerde schade heeft een kleinere k_8 tot gevolg en een kleinere geaccepteerde schade

een grotere k_8 -faktor. Het resultaat van de proeven T9 en T10 was:

afstand achter de pijler m	k_8	
	geen verdieping	verdieping 10 m
0	1,43	< 1,01
45	1,18	< 1,01
90	1,10	< 1,01

Uit de resultaten valt af te leiden dat er inderdaad een relatie is tussen k_8 en de afstand achter de pijler. Bij een verdieping van 10 m was de k_8 -faktor niet vast te stellen, aangezien ten gevolge van de stroomvertraging door de verdieping de kritieke stroomsnelheid (u_k) groter of gelijk was aan de kritieke stroomsnelheid zonder pijler (u_{ok}).

Behalve uit bovenstaande proeven is de k_8 -faktor ook te bepalen uit een aantal proeven van het onderzoek naar de stabiliteit van de negatieve overlap voor situaties met pijlerinvloed M 1934 [4].

In dit onderzoek is de stabiliteit van de bestorting van de negatieve overlap onderzocht. Vergelijking van de stabiliteit van de kruin van de negatieve overlap met en zonder pijler geeft een k_8 -faktor van ca. 1,4. Dit resultaat wordt verkregen door deling van de in dit onderzoek bepaalde relevante C_s -waarden (zone B, en waar nodig zone A (T11...T14) (tabel 7)).

De twee methoden zijn echter niet goed vergelijkbaar. De vergelijkingsgrondslag is bij het onderzoek M 1934 beter door gebruik te maken van de verhouding van een op dezelfde wijze bepaalde grootte (C_s), de geometrie wijkt echter aanzienlijk af van de geometrie waaraan de k_8 -faktor gerelateerd is. Uit het onderzoek blijkt wel dat de grootte van de k_8 -faktor snel afneemt met toename van de afstand achter de pijler.

Geconcludeerd kan worden dat de grootte van de k_8 -faktor moeilijk is te bepalen. Het schadekriterium, de afstand ten opzichte van de pijler en de plaats van de schade zijn hier de oorzaak van.

Een zo goed mogelijke schatting van de k_8 -faktor is:

afstand achter de pijler m	k_8 (h>20 m)	
	geen verdieping	verdieping 10 m
0	1,5	1,18
45	1,35	1,05
90	1,2	1,0

Gezien het gevonden omslagpunt bij de k_2 -faktor is te verwachten dat bij een verdieping van 10 meter en een waterdiepte < 20 m de k_8 -faktor groter zal zijn dan de gegeven schatting.

Uitvoeringsaspecten (proeven T11...T14)

Een aantal proeven is uitgevoerd met het doel inzicht te verkrijgen in de gevolgen van verschillende stortvolgordes bij de uitvullaag en de onderlaag. Onderzocht zijn (figuur 4) de combinaties van bestortingen in de vakken:

vak 1 proef T11
vak 1+2+3 proef T12
vak 2+3 proef T13
vak 1+4+5 proef T14.

Alle proeven zijn uitgevoerd met een verdieping van 10 m.

Resultaat

Proef T11

Aantasting vindt plaats bij een aanstroomsnelheid van 2,9 m/s (foto 24). Vergelijking met proef T3 opbouwphase 1 (vrijwel gelijke dikte van bestorting) toont dat dit resultaat gelijk is aan de proeven voor het bepalen van k_2 , zodat blijkt dat er in vak 1 geen invloed is van het ontbreken van een bestorting op de taludhelling. De stabiliteit van de bestorting met alleen vak 1 bestort, kan dus afgeleid worden met behulp van de relaties voor de drempel, opbouwphase 1.

Proef T12

Uit het voorgaande blijkt reeds dat een aangebrachte bestorting bovenstrooms van vak 1 geen invloed zal hebben op de stabiliteit van vak 1. Het resultaat van de proef bevestigt dit, dus u_k vak 1 komt overeen met u_k vak 1 bij proef

T11. De u_k voor vak 2 en vak 3 is groter dan u_{ok} aangezien hier geen schade optrad.

Proef T13

Hierbij ontstaat schade in een klein gebied bij de hoekpunten van de voetplaat van de pijler. Deze plaats behoort nog bij het invloedsgebied van de pijler. Door het niet bestort zijn van vak 1, treedt er echter wel eerder schade op doordat de stenen van de rand van vak 2 op de gladde bovenmat makkelijk wegrollen. Deze schade begint bij een aanstroomsnelheid van ca. 2,4 m/s, ofwel 15% ongunstiger dan bij een aanwezige bestorting in vak 1. Bij toenemende stroomsnelheid ontstaat een kleine half cirkelvormige aantasting, waarvan de grootte wordt bepaald door de stroming rond de kop van de pijler. De omvang van het schadegebied neemt nauwelijks toe bij stroomsnelheden groter dan 2,6 m/s. Het geërodeerde materiaal zet zich voornamelijk af in vak 1. De konklusie is dat bij afwezigheid van de bestorting in vak 1 de kritieke aanstroomsnelheid in vak 2, berekend volgens de methode van de drempel, 15% wordt verlaagd, echter alleen nabij de hoekpunten van de voetplaat van de pijler.

Proef T14

Uit de proeven voor het bepalen van k_8 valt af te leiden dat in vak 4 bij een verdieping van 10 m geen schade zal optreden. De maximum aanstroomsnelheid bij proef T14 bedroeg $0,9 u_{ok}$; hierbij trad nog geen schade op.

Gekonkludeerd kan worden dat voor alle vakken, met uitzondering van kleine gebieden bij de hoeken van de voetplaat van de pijler, de stabiliteit van de uitvullaag berekend kan worden met behulp van de methode voor het berekenen van de stabiliteit van de drempel of de k_8 -faktor.

De laagdikte van de bestorting, indien niet groter dan 1,5 à 2,5 m, is hierbij nauwelijks van invloed, zodat voor kleinere laagdikten dezelfde waarden kunnen worden gebruikt.

Diverse stroomsnelheidsmetingen

Ten behoeve van uitvoeringstechnische aspecten zijn op een aantal plaatsen stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd, waarvan de resultaten in tabel 4 zijn weergegeven. Voor meetpunt A is de gemiddelde aanstroomsnelheid (u_0) gegeven, in de overige meetpunten is de verhouding tussen de gemeten stroomsnelheid en

u_A gegeven.

Bij scheve aanstroming zijn de pijlers en de negatieve overlap 15° gedraaid. De meetpunten A...F blijven echter in de gootas gedefiniëerd, de meetpunten G, H, I, en K zijn wel met de pijler mee gedraaid (zie figuur 4).

6. Kwantitatieve aspecten

In het voorgaande hoofdstuk heeft de nadruk gelegen op het kwalitatieve aspect, de grootte van u_k met bijbehorende geringe schade. Bij overschrijding van de kritieke stroomsnelheid ontstaat na zekere tijd een grotere schade aan het reeds aangebrachte deel van de drempel. Met behulp van de proefresultaten en bekende theorieën zijn over deze kwantitatieve aspecten, zowel naar tijd als grootte van de schade, een aantal indicaties te geven.

6.1 Tijdschalen

De tijdschalen voor de aantasting van de bestortingen rondom konstrukties kunnen geschat worden met behulp van de tijdschaalregels uit het ontgrondingsonderzoek M 863 [6], waarbij dezelfde uitwerking is aangehouden als bij het onderzoek M 1611 [2].

Uitgangspunt is de relatie:

$$n_t = \frac{n_{\Delta}^{1,7} n_1^2}{n(\alpha u - u_k)^{4,3}} = \frac{n_{\Delta}^{1,7} n_1^2}{n(\alpha \frac{u}{u_k} - 1)^{4,3} n_{u_k}^{4,3}} \quad (5)$$

waarin:

$$n_t = \text{tijdschaal} = \frac{t_{\text{prototype}}}{t_{\text{model}}} \quad (-)$$

$$t = \text{tijdsduur waarin een bepaalde uitschuring is bereikt} \quad (s) \quad (s)$$

$$\Delta = \text{relatieve dichtheid} \quad (-) \quad (-)$$

$$n_1 = \text{lengteschaal} \quad (-) \quad (-)$$

$$\alpha = \text{faktor waarmee } u \text{ vermenigvuldigd moet worden om de invloed van de geometrie op de } u \text{ weer te geven} \quad (-) \quad (-)$$

$$u_k = \text{kritieke stroomsnelheid} \quad (m/s) \quad (m/s)$$

Bij afwezigheid van viskositeitsinvloed geldt:

$$n_{\alpha} = 1 \text{ en } n \frac{u}{u_k} = 1, \text{ zodat}$$

$$n(\alpha \frac{u}{u_k} - 1) = 1$$

Na substitutie in (5) ontstaat de relatie:

$$n_t = \frac{n_{\Delta}^{1,7} n_1^2}{n_{u_k}^{4,3}} \quad (6)$$

De kritieke stroomsnelheid wordt bepaald uit:

$$u_k = u_{*k} \frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\psi \Delta g D} \frac{C}{\sqrt{g}} = C \sqrt{\psi \Delta D}$$

waarin

- u_{*k} = kritieke schuifspanningssnelheid (m/s)
- C = waarde voor de ruwheid volgens De Chezy ($C = 18 \log \frac{12 h}{2D_{50}}$) ($m^{1/2}/s$)
- ψ = transportparameter (-)
- Δ = relatieve dichtheid (-)
- D = steendiameter (D_{50} of D_n) (m)
- g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
- h = waterdiepte (m)

De schaal van de kritieke stroomsnelheid kan dus geschreven worden als:

$$n_{u_k} = n_C n_{\psi}^{0,5} n_{\Delta}^{0,5} n_D^{0,5}$$

Bij afwezigheid van viskositeitsinvloed is $n_{\psi} = 1$, zodat

$$n_{u_k} = n_C n_{\Delta}^{0,5} n_D^{0,5} \quad (7)$$

substitutie van (7) in (6) geeft:

$$n_t = \frac{n_{\Delta}^{1,7} n_1^2}{(n_C n_{\Delta}^{0,5} n_D^{0,5})^{4,3}} = \frac{n_1^2}{n_C^{4,3} n_{\Delta}^{0,45} n_D^{2,15}} \quad (8)$$

Uitgaande van (8) kan nu voor diverse materialen de tijdschaal berekend worden, onderstaande tabel geeft het resultaat.

	model ($n_1 = 30$)	steensortering prototype				
		40/160 mm	40/250 mm	10/60 kg	60/300 kg	300/1000 kg
D_{50}	0,006	0,08	0,12	0,22	0,40	0,58
Δ	1,6	2,22	1,6	1,6	1,6	1,93
C	53	59	56	51	46	43
n_t	1	1,9	1,1	0,5	0,2	0,1

In het totaal is steeds ca. 0,5 uur gestroomd, de proefresultaten zijn met bovenstaande tabel indien gewenst te vertalen naar prototype-tijden.

6.2 Transportrelatie

Bij de bepaling van u_k is gesteld:

$$S :: u^{12,5} \quad (9)$$

In plaats van u kan echter ook de verhouding $\frac{u}{u_k}$ genomen worden, vergelijking (9) gaat dan over in:

$$S :: \left(\frac{u}{u_k}\right)^{12,5} \quad (10)$$

Analyse van de proefresultaten (figuur 8) met betrekking tot de schade en de kuildiepte geeft:

$$h = \left(\frac{S}{16200}\right)^{1/3} \quad (11)$$

waarin:

h = kuildiepte (m)

S = hoeveelheid schade (kg)

Bij het vaststellen van relatie (11) is, op enigszins subjectieve wijze, de waarneming verwerkt dat bij kleinere schades (< 1 m) een deel van de schade niet tot de kuilinhoud gerekend mag worden. De vorm van de kuil is dan nog zodanig ongedefinieerd dat ten onrechte de verspreid optredende schade in de omgeving van de kuil door de gevolgde methodiek (alleen totale schade is bepaald) vanzelf tot de kuilinhoud wordt gerekend.

Kombinatie van (10) en (11) geeft

$$h :: \left(\frac{u}{u_k}\right)^{4,2} \quad (12)$$

Uit de literatuur [8] is bekend:

$$h_t = h_s \left(\frac{t}{t_s}\right)^{0,35} \quad (13)$$

waarin

h_t = kuildiepte na een gewenste tijdsduur (m)

h_s = referentie kuildiepte ($\approx 0,5$ m) (m)

t = gewenste tijdsduur (u)

t_s = tijdsduur waarbij $h_s \approx 0,5$ m (u)

De kuildiepte h_s behoort bij een stroomtijd van 0,5 uur in het model, met $u/u_k = 1$; bij 1 uur stromen wordt $h_t = h_s \left(\frac{1}{0,5}\right)^{0,35} = 0,64$ m, zodat (13) geschreven kan worden als

$$h_t = 0,64 \left(\frac{t}{t_s}\right)^{0,35}$$

Aangezien $t_s = 1$ gaat de vergelijking over in

$$h_t = 0,64 (t)^{0,35}$$

waarin t = tijdsduur in het model.

Voor het prototype wordt de vergelijking, met gebruikmaking van de tijdschalen volgens de tabel van blz. 25:

$$h_t = 0,64 (n_t \cdot t)^{0,35} \quad (14)$$

Substitutie van (12) in (14) geeft

$$h_t = 0,64 \left(\frac{u}{u_k}\right)^{4,2} (n_t \cdot t)^{0,35} \quad (15)$$

Substitutie van (11) in (15) geeft

$$S = 16200 \left[0,64 \left(\frac{u}{u_k}\right)^{4,2} (n_t \cdot t)^{0,35}\right]^3 \quad (16)$$

Met de vergelijking (15) en (16) is dus voor allerlei steensorteringen een indruk te verkrijgen van de hoeveelheid schade en de bijbehorende kuildiepte.

Opgemerkt moet worden dat de exponent 0,35 in (13) in de praktijk blijkt te variëren, zowel tijdens het verloop van het aantastingsproces (tijdsafhankelijk) als bij een andere verhouding van u/u_k . De uitkomsten van berekeningen met de vergelijkingen (15) en (16) moeten dus als indicatief worden beschouwd.

LITERATUUR

- 1 AKKERMAN, G.J.,
Stormvloedkering Oosterschelde. Stroombestendigheid van de drempel tijdens de bouwfase.
Verslag modelonderzoek, M 1524 deel 1, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, augustus 1983
- 2 AKKERMAN, G.J.,
Stormvloedkering Oosterschelde. Uitschuring van het fundatiebed door de aanwezigheid van materieel.
Verslag modelonderzoek M 1611, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, mei 1980
- 3 HARDEVELD, C. van,
Stormvloedkering Oosterschelde. Stroombestendigheid van de drempel tijdens de bouwfase, Meetresultaten onderzoek met meerdere pijlers.
Verslag modelonderzoek M 1524, deel III, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, augustus 1983
- 4 HARTSUIKER, G.,
Stormvloedkering Oosterschelde. Stabiliteit negatieve overlap voor situaties met pijlerinvloed.
Verslag modelonderzoek M 1934, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, september 1983
- 5 OVEREEM, J. van,
Literatuuronderzoek naar de formules voor de bodemschuifspanning en wrijvingscoëfficiënten voor zowel golven als golven en stroom.
Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, maart 1978
- 6 SCHUKKING, W.H.P.,
Systematisch onderzoek naar twee- en drie-dimensionale ontgrondingen,
Verslag modelonderzoek M 648/M 863 delen I, II en III, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1972

LITERATUUR (vervolg)

7 TAAT, J.J.,

Stormvloedkering Oosterschelde. Stroombestendigheid van de drempel tijdens de bouwfase. Meetresultaten onderzoek met één pijler.

Verslag modelonderzoek M 1524, deel II Waterloopkundig Laboratorium, Delft, augustus 1983

8 THABET, R.A.H., en anderen

Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Erosie en stabiliteit van bodem en oevers; inleiding tot relevante verschijnselen.

Verslag modelonderzoek M 1115 deel VIII, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, januari 1982.

Omschrijving	Proef	Bepaling								opmerkingen
		k ₄	k ₂	k ₆	k ₇	k ₈				
bepaling u _{ok}	T1									
bepaling k-factoren	T2	x								
	T3		x							
	T4			x						
	T5				x					
	T6					x				afwijkende waterdiepte (20 m)
	T7		x		x					
controle superpositie	T8	x	x	x						
invloedsfactor voor overgangskonstructie	T9									zonder verdieping
	T10								x	met verdieping
uitvoeringsaspecten	T11									bestorting alleen in
	T12									aangegeven vakken
	T13									
	T14									
snelheidsmetingen	-									

Tabel 1 Proevenprogramma

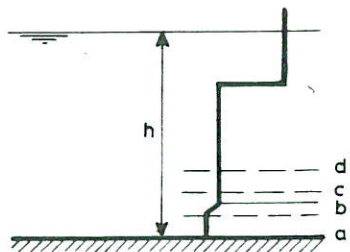
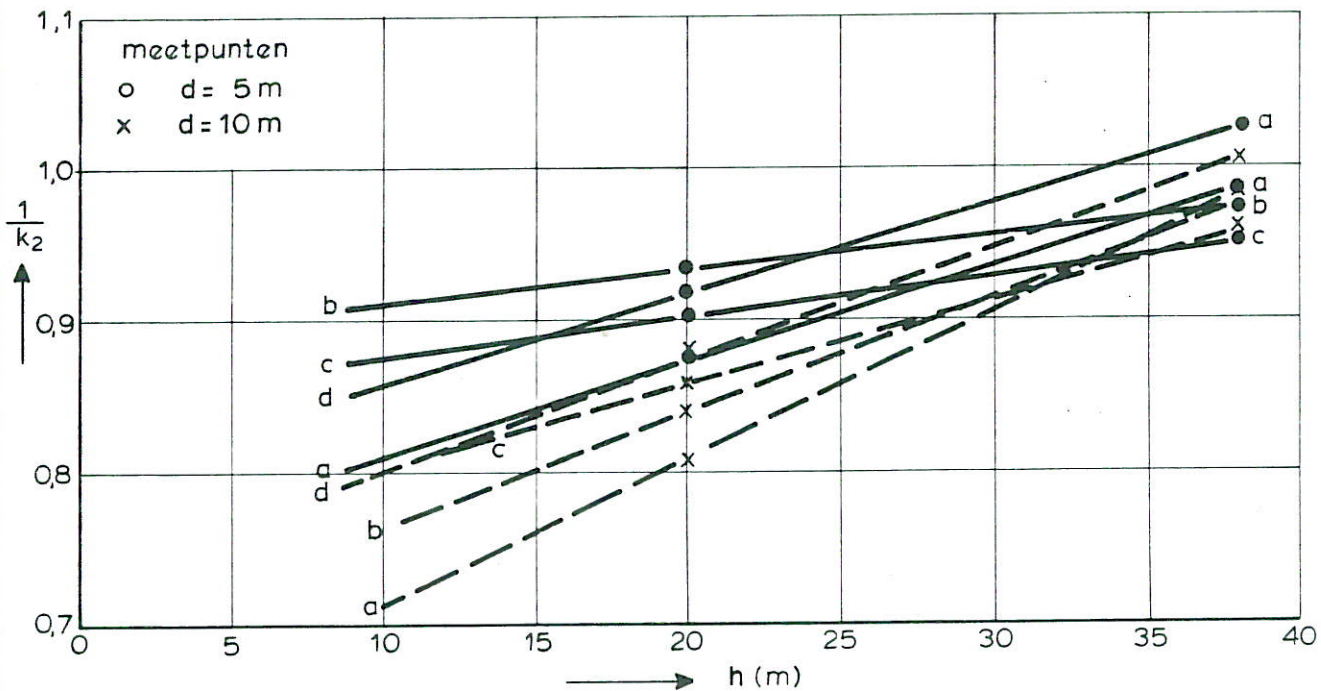
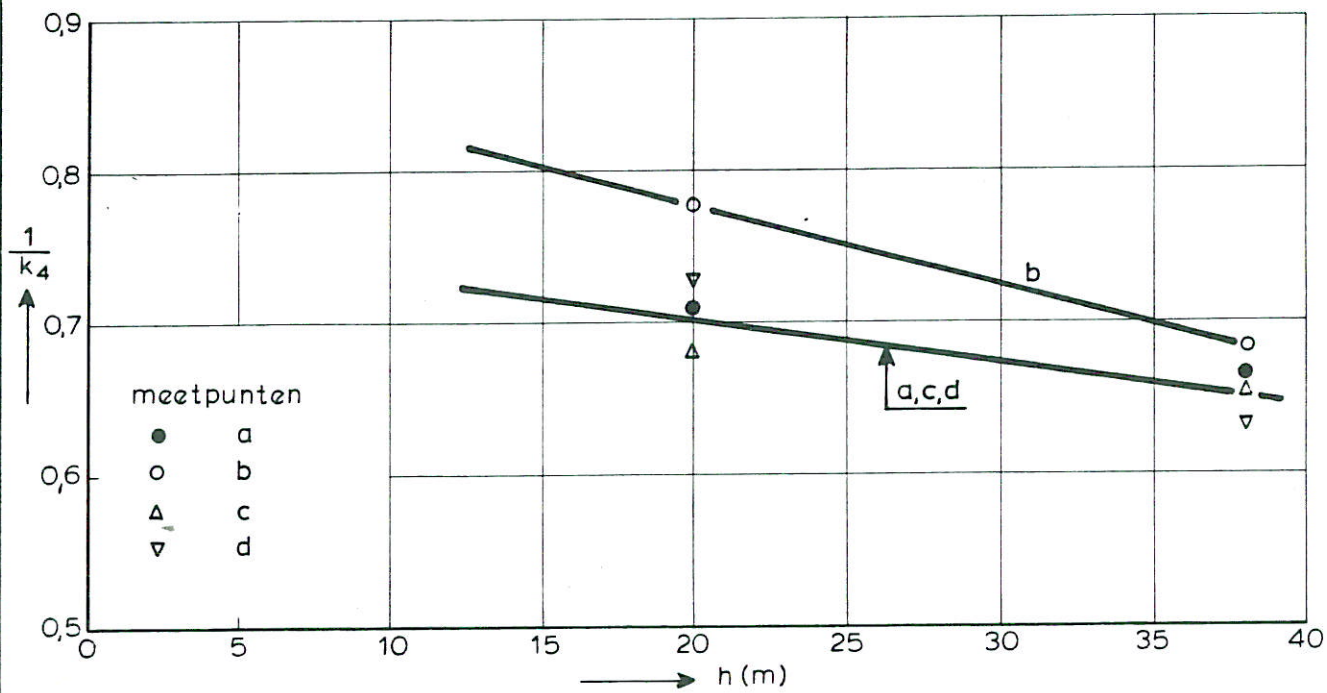
proef	opbouwfase																	
	1				2				3									
	lokatie		lokatie		lokatie		lokatie		lokatie		lokatie							
	S	h	S	h	S	h	S	h	S	h	S	h						
kg	m	kg	m	kg	m	kg	m	kg	m	kg	m							
u _A	gemiddeld		u _A	gemiddeld		u _A	gemiddeld		u _A	gemiddeld		u _A	gemiddeld					
m/s	S	h	m/s	S	h	m/s	S	h	m/s	S	h	kg	h	m				
T2	1,78 1,95 2,07 2,08 2,27 2,41 a = 13,4 c = 2,05 u _k = 1,74	1453 6413 22982 18376 50795 128250	- - 0,6 0,75 1,45 2,25	1791 7720 37927 19890 47048 105273	- - 1,0 0,75 1,40 1,95	1310 7495 38340 17088 35681 147690	- 0,3 0,6 0,3 1,0 1,95	1164 6602 20439 16292 31312 131220	0,3 0,3 0,6 0,45 0,9 1,5	1237 7048 29389 16691 33496 139455	- 0,3 0,8 0,38 0,95 1,73	1,78 1,95 2,07 2,08 2,27 2,41 a = 14,4 c = 1,86 u _k = 1,75	143 324 1885 7638 22410 57510	0,15 0,2 0,5 0,6 0,7 2,0	189 448 2381 7489 23625 60818	0,15 0,2 0,5 0,6 0,7 1,8	166 386 2133 7564 23018 59164	0,15 0,2 0,5 0,6 0,75 1,9
T3	2,75 2,95 3,23 a = 18,3 c = 0,0037 u _k = 2,88	734 5203 16283	389 1555 6033	562 3379 11159	1164 6091 41782	1145 4714 25931	1154 5403 33857	2,42 2,70 2,91 3,16 a = 17,8 c = 0,0266 u _k = 2,66	972 2811 19227 91268	554 3482 2213 76173	763 3482 2213 76173	2,42 2,70 2,91 3,16 a = 17,8 c = 0,0266 u _k = 2,66	9497 40500 246915	0,4 1,0 3,0	5512 31050 153711	0,5 0,5 2,2	n.v.t. n.v.t. n.v.t.	
T4	1,42 1,62 1,71 1,82 2,10 2,28 a = 11,9 c = 5,44 u _k = 1,61	19 367 575 1669 4302 19665	0 1669 4507 16957 39745 132355	n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t.	81 1199 2846 16375 44075 160553	- - - 0,4 0,6 1,0	81 610 1319 3916 16111 93277	1,42 1,62 1,71 1,82 2,10 2,28 a = 15,5 c = 4,16 u _k = 1,64	9497 40500 246915	0,4 1,0 3,0	5512 31050 153711	0,5 0,5 2,2	n.v.t. n.v.t. n.v.t.					
T5	2,07 2,25 2,42 a = 11,0 c = 2,48 u _k = 1,71	24300 72630 106920	0,9 2,1 2,4	23682 67703 132098	1,0 1,95 2,55	35100 100170 212220	1,1 1,5 2,1	2,07 2,25 2,42 a = 10,1 c = 4,31 u _k = 1,64	1188 2862 9450 32076 96948	0,5 0,6 0,7 1,0 2,0	567 1485 5481 28053 86319	0,3 0,4 0,7 1,0 1,8	878 2174 7466 30065 91633	0,4 0,5 0,7 1,0 1,9				
T6	2,56 2,72 a = 15,1 c = 0,00836 u _k = 2,70	964 2112	0,5 0,4	978 2437	0,4 0,4	1571 5081	0,6 1,0	2,56 2,72 a = 17,4 c = 0,0156 u _k = 2,57	2981 9350 32060	0,6 0,9 1,1	3143 8170 27993	0,6 0,75 1,1	3062 8760 30026	0,6 0,85 1,1				
T7	1,75 2,42 a = 5,7 c = 9,72 u _k = 1,53	80 20978	0,4 1,5	n.v.t. n.v.t.	n.v.t. n.v.t.	4130 100601	0,2 1,0	1,75 2,42 a = 9,9 c = 2,69 u _k = 1,70										
T8	2,73 2,93 3,20 3,30 a = 14,8 c = 0,00712 u _k = 2,73	105 635 1740 3277	1485 5003 13460 28493	n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t.	2130 11040 44115 106485	205 635 1308 3283	2,73 2,93 3,20 3,30 a = 19,8 c = 0,020 u _k = 2,51	2,45 2,66 2,95 3,18 a = 10,5 c = 0,106 u _k = 2,20	9032 28315 57748 161172	1,0 4,0 4,0 1,172	721 2044 3759 12723	1,5 1,5	n.v.t.					

S = schade
h = kuildiepte
u_A = Gemiddelde aanstroomsnelheid, meetpunt A
a = exponent in S = cu
c = constante
u_k = kritieke aanstroomsnelheid
(u_k = 2025 kg, a = 12,5)

Tabel 2 T2...T8 Resultaten metingen

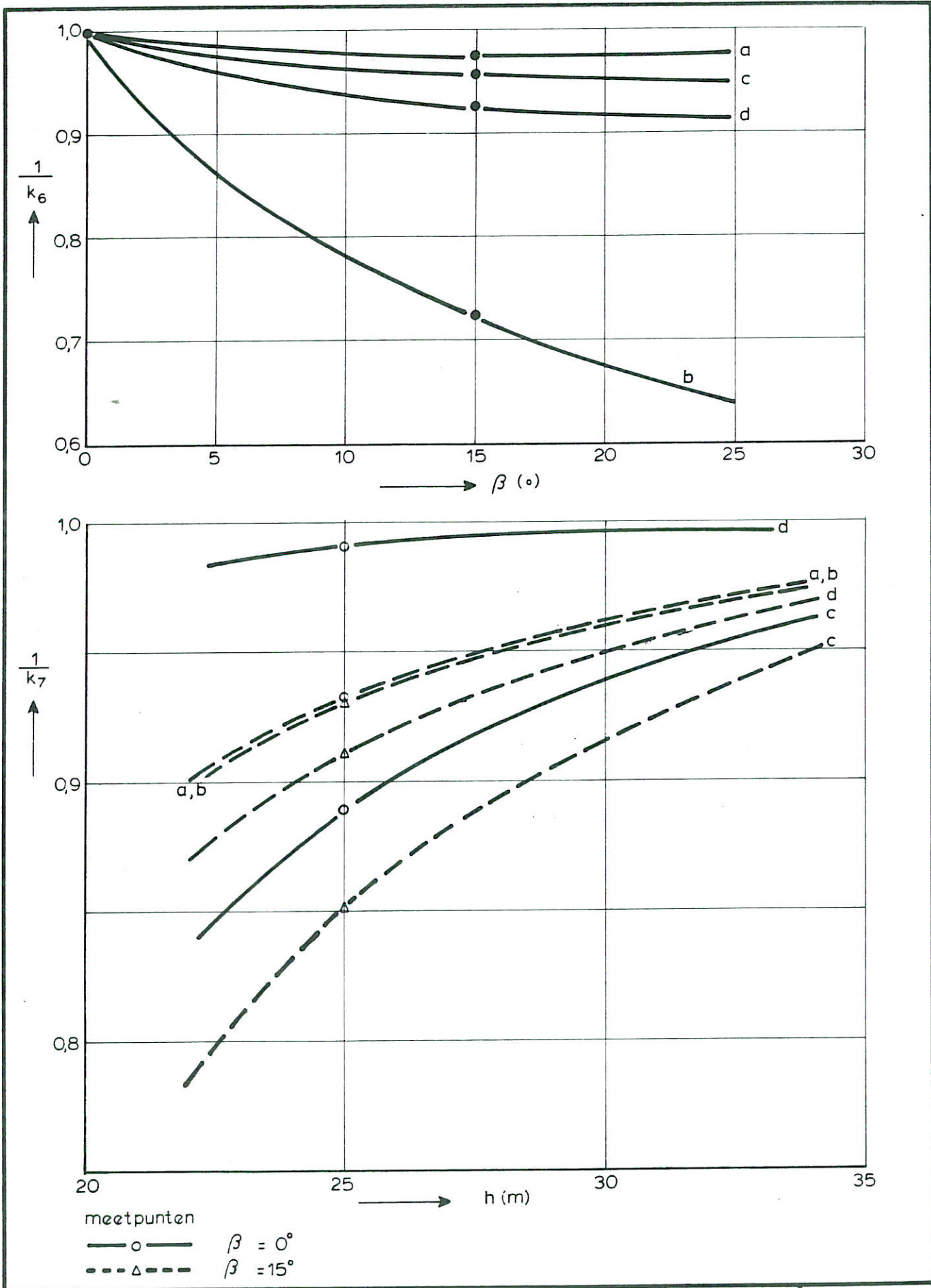
	v _{ok} m/s	opbouw- fase	k ₄			k ₂			k ₆		k ₇		k ₄ . k ₆ . k ₇		k ₂ . k ₄ . k ₆	
			u _k	k ₃	k ₄	u _k	k ₁	k ₂	u _k	k ₆	u _k	k ₇	gemeten u _k	πk	gesuper- poneerd	gemeten u _k
T1	3,75															
T2	3,75	1	1,74	1,45	1,47											
		2	1,75	1,49	1,44											
		3	1,73	1,76	1,23 (1,30)											
T3	3,49	1				2,88	0,6	0,95								
		2				2,69	0,6	1,01								
		3				2,46	0,6	1,03								
T4	3,75	1							1,61	1,09						
		2							1,64	1,07						
		3							1,54	1,06						
T5	3,75	1								1,71	1,03					
		2								1,64	1,07					
		3								1,58	1,04					
T6	3,49	1	1,58	1,44		2,70	0,5	1,14								
		2	1,64	1,41		2,57	0,5	1,18								
		3	2,07	1,24		2,29	0,5	1,19								
T7	3,75	1									1,53	1,69	1,65(-2,4%)			
		2									1,70	1,48	1,65(+11,5%)			
T8	3,49	1												2,73	1,47	1,52(+3,4%)
		2												2,51	1,56	1,56(+0,0%)
		3												2,20	1,50	1,42(-5,3%)

Tabel 3 T1...T8 Overzicht k-factoren

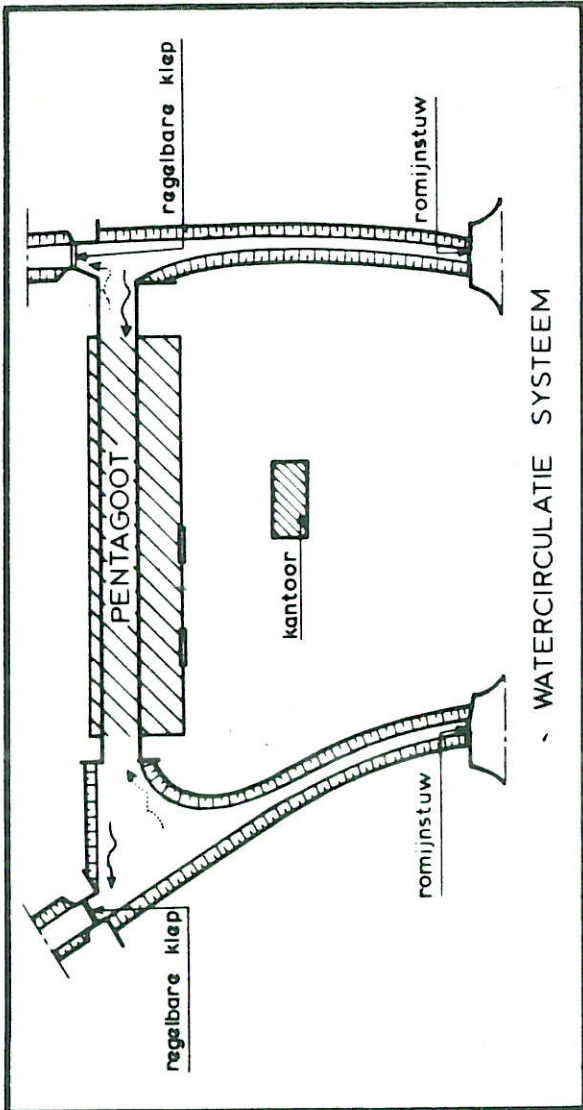


opbouw fase	$\frac{1}{k_5}$
a	0,9
b	1,0
c	1,0
d	1,0

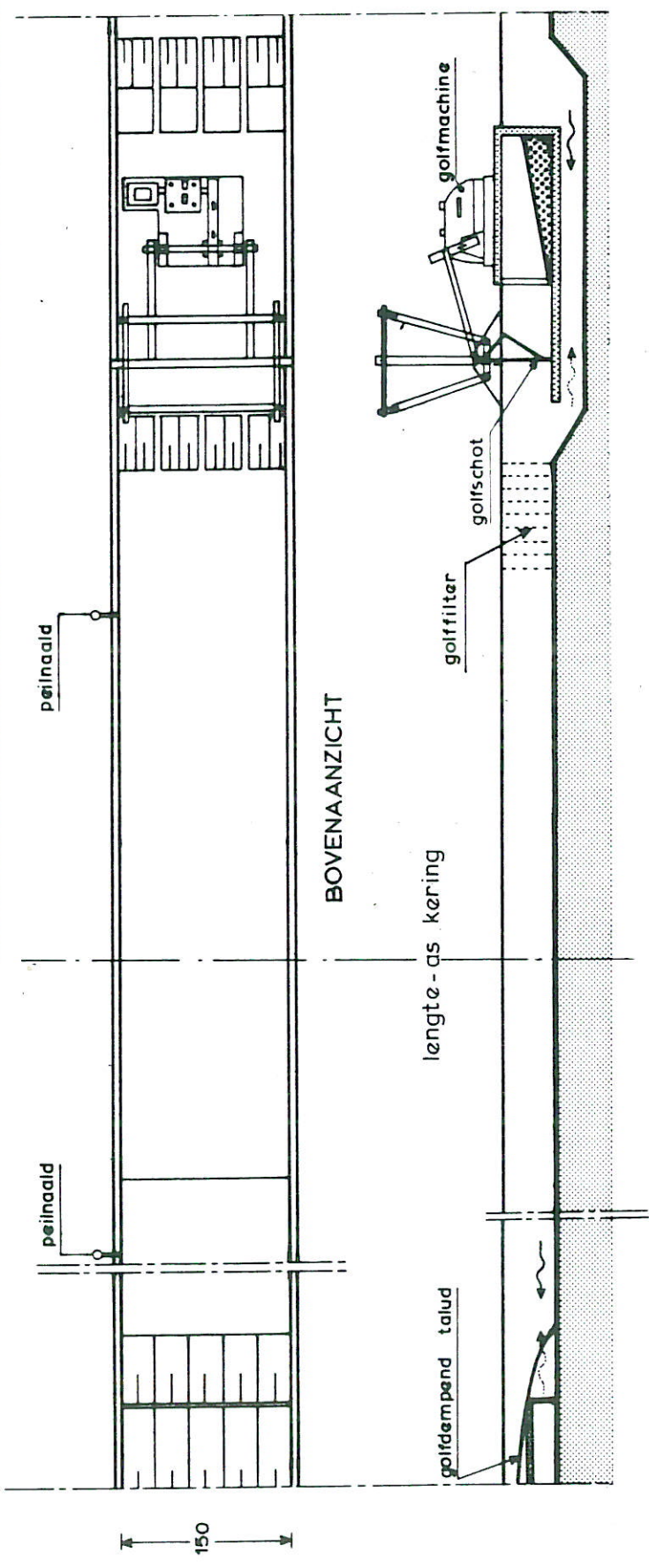
INVLOEDSFAKTOREN VAN DE PIJLER
EN DE VERDIEPING VOLGENS M 1524



INVLOEDSFACTOREN VOOR SCHEVE
 AANSTROMING EN GOLVEN VOLGENS M1524



WATERCIRCULATIE SYSTEEM

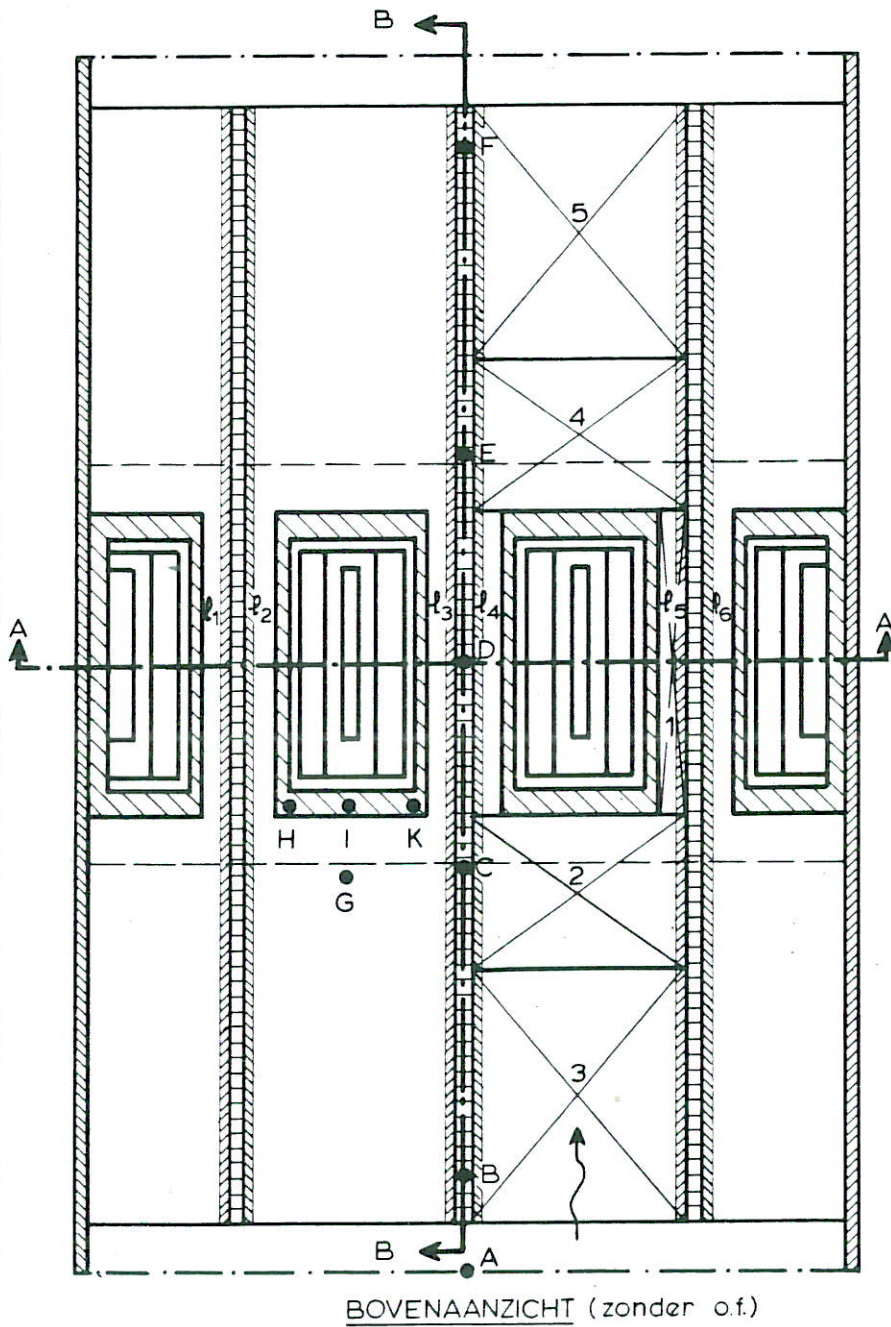


LANGSDOORSNEDE

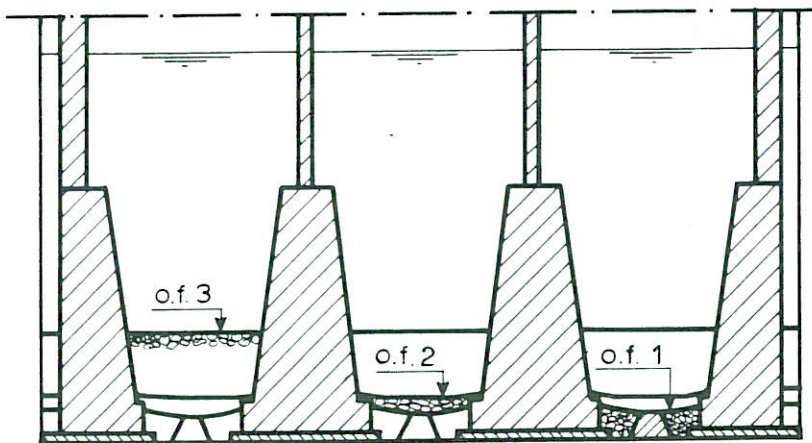
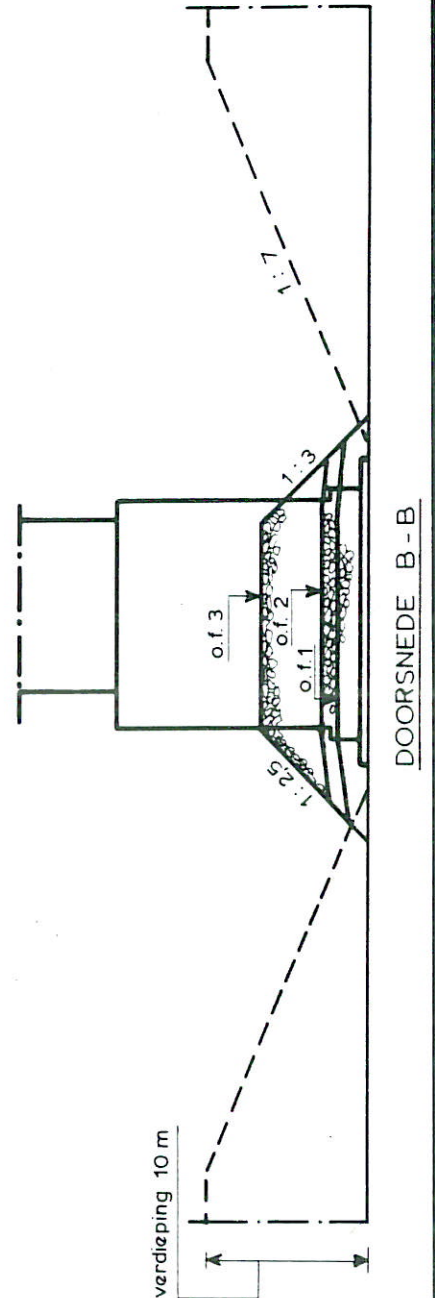
maten in m prototype

OVERZICHT PENTAGOOT

SCHAAL 1 : 6000



BOVENAANZICHT (zonder o.f.)



DOORSNEDE A - A

- A = referentie punt voor aanstroomsnelheid (u_A)
- ⊠ = bestortingsvak T 11... T 14
- ℓ = lokatie waar schade is bepaald
- o.f. = opbouwfase
- B... K = meetpunten stroomsnelheid

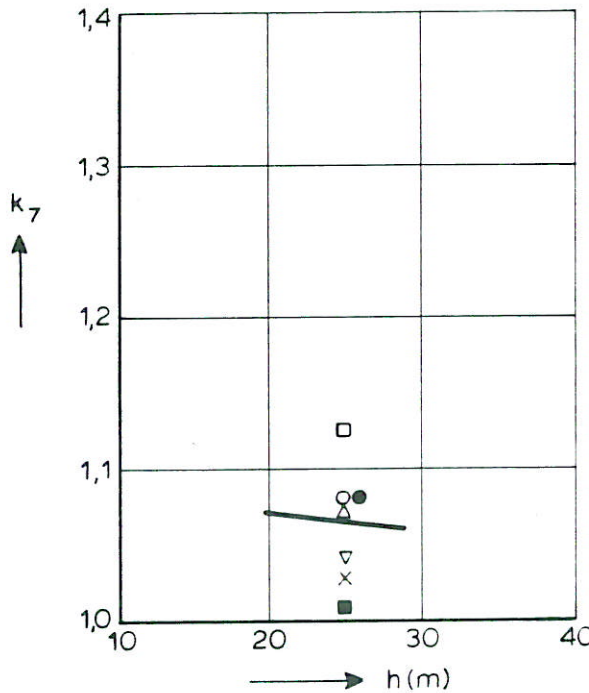
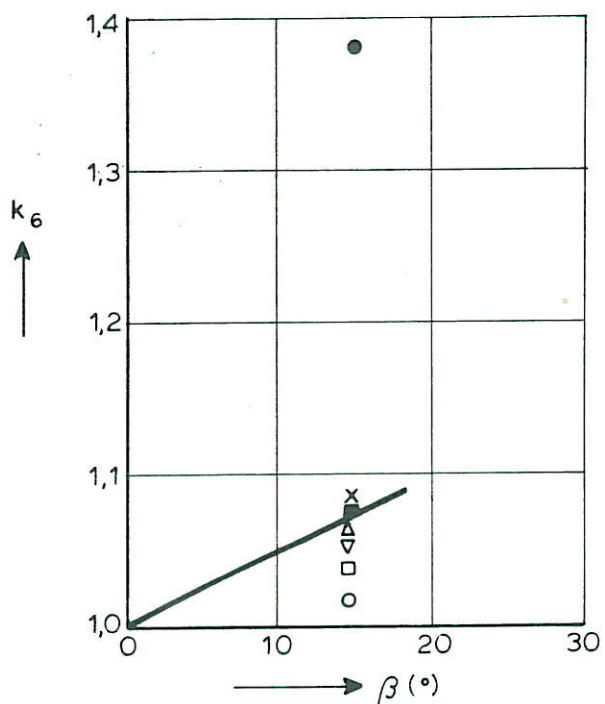
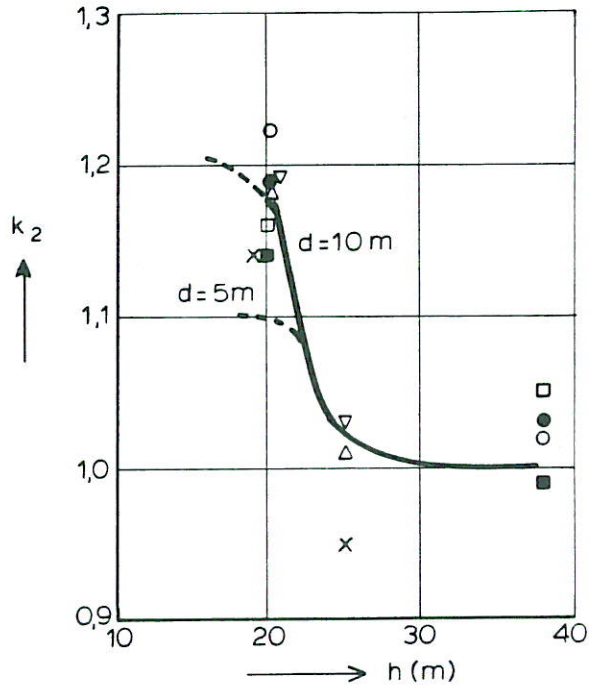
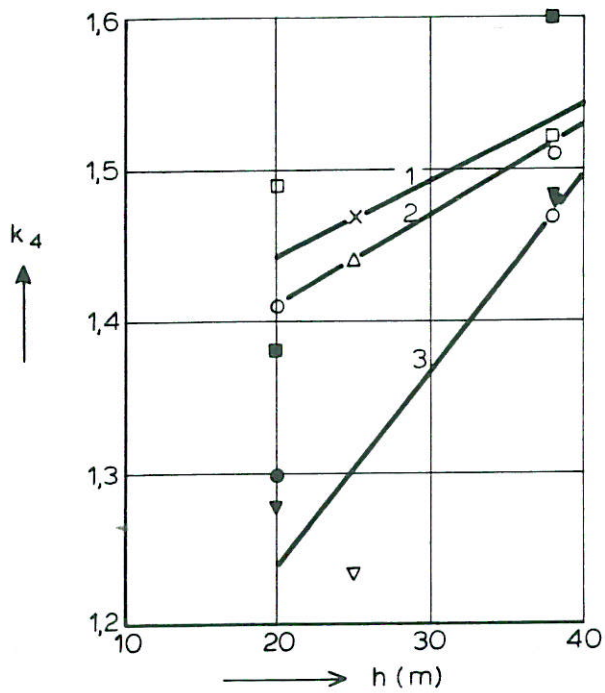
PROEFOPSTELLING

SCHAAL HOR. 1:1500
VERT. 1: 500

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1974

FIG. 4

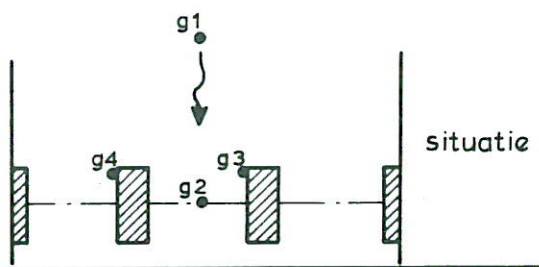
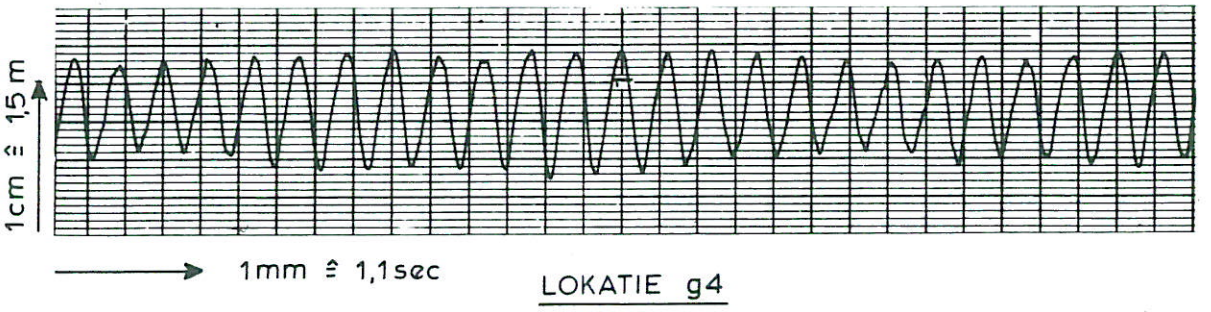
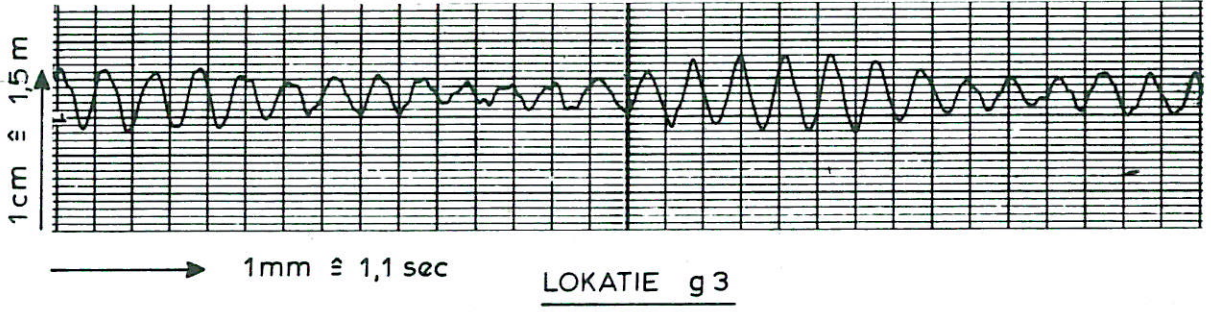
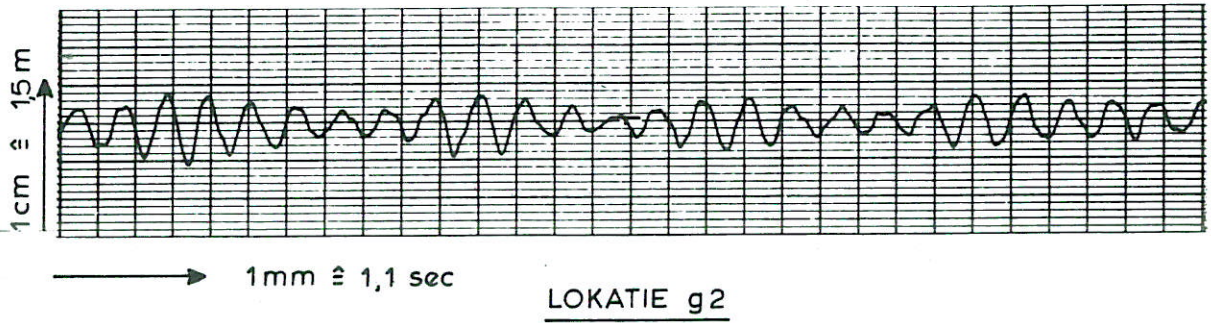
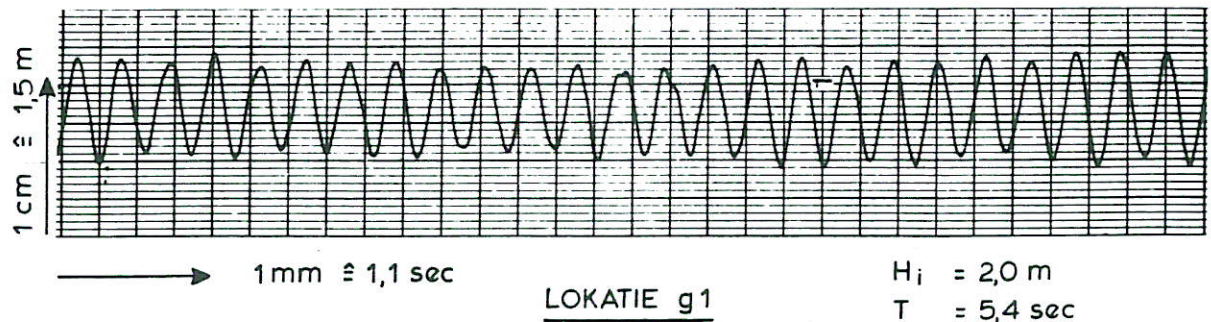


M 1974	k_3	d_r (m)
x opbouwfase 1	1,45	1,5
Δ opbouwfase 2	1,49	2,6
▽ opbouwfase 3	1,76	6,6

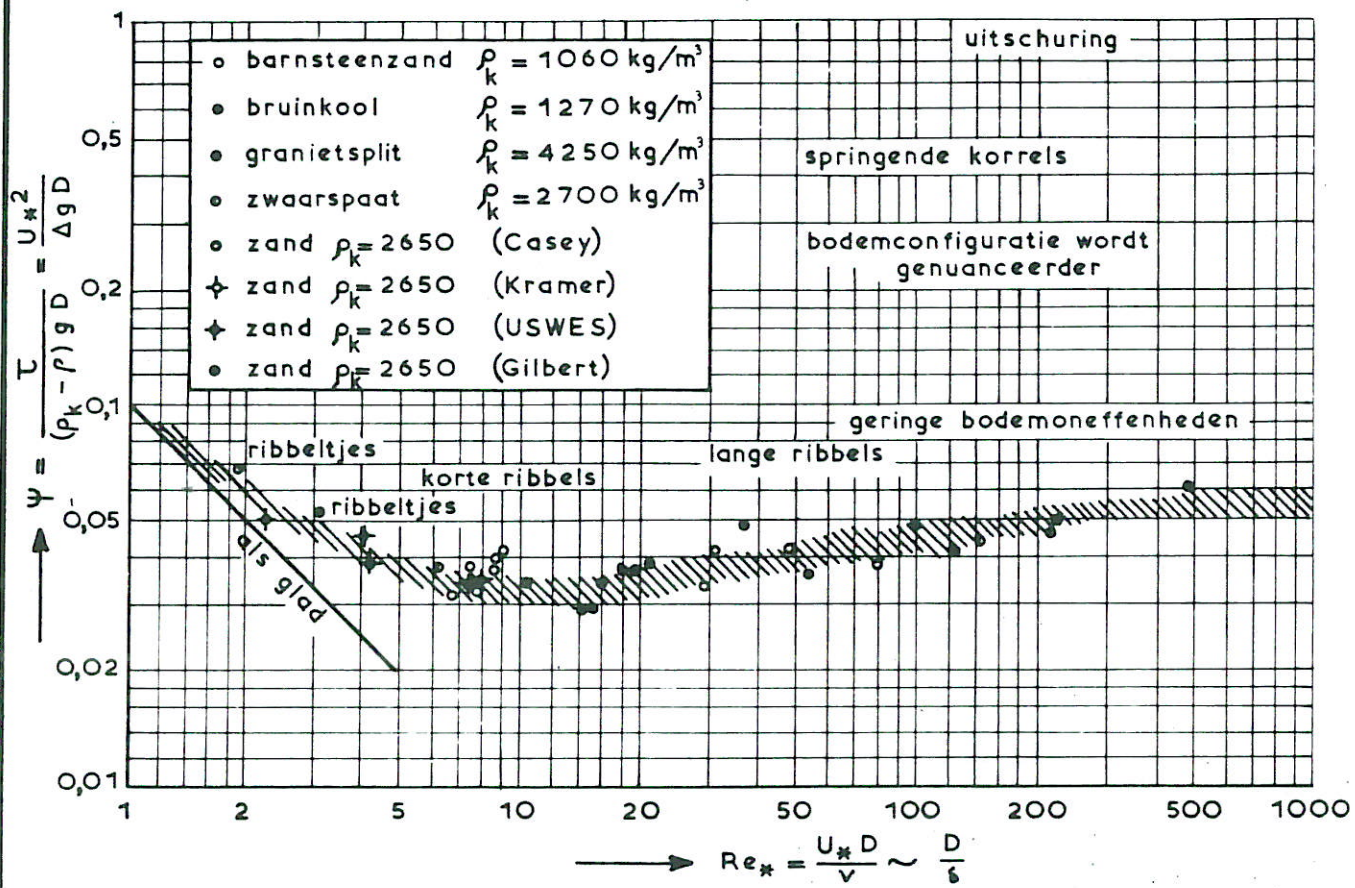
M 1524	k_3	d_r (m)
○ opbouwfase a	1,39	0
● opbouwfase b	1,43	1,5
□ opbouwfase c	1,48	3,5
■ opbouwfase d	1,62	6,0
▽ opbouwfase d	1,75	(gecorrigeerd)

d_r = hoogte opbouwfase

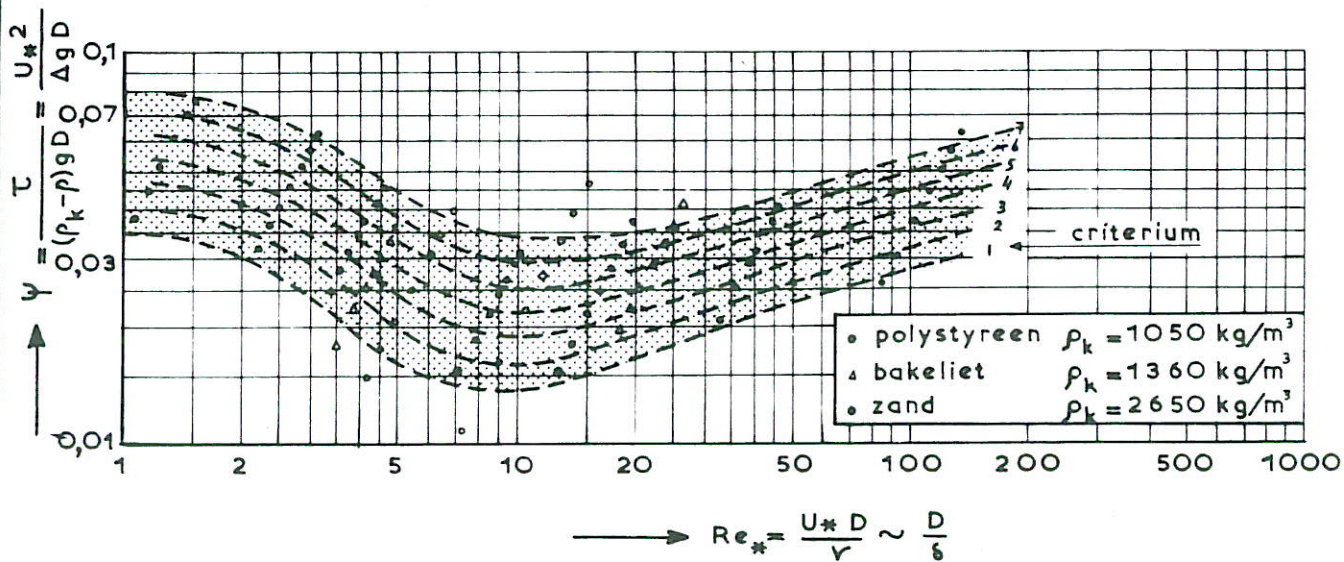
INVLOEDSFAKTOREN k_4, k_2, k_6, k_7



OPGETREDEN GOLFHOOGTEN

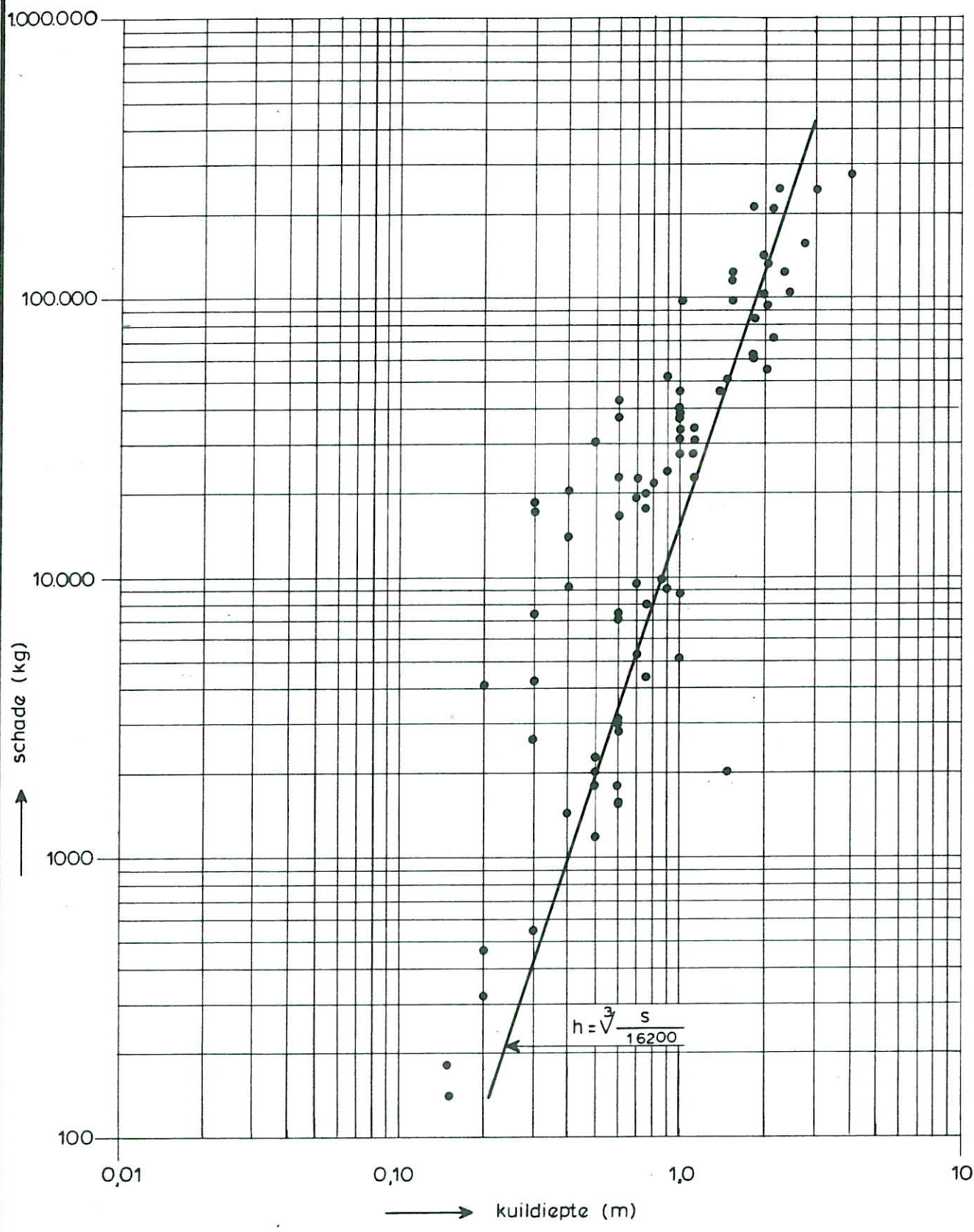


BEGIN VAN BEWEGING VOLGENS SHIELDS



BEGIN VAN BEWEGING VOLGENS WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

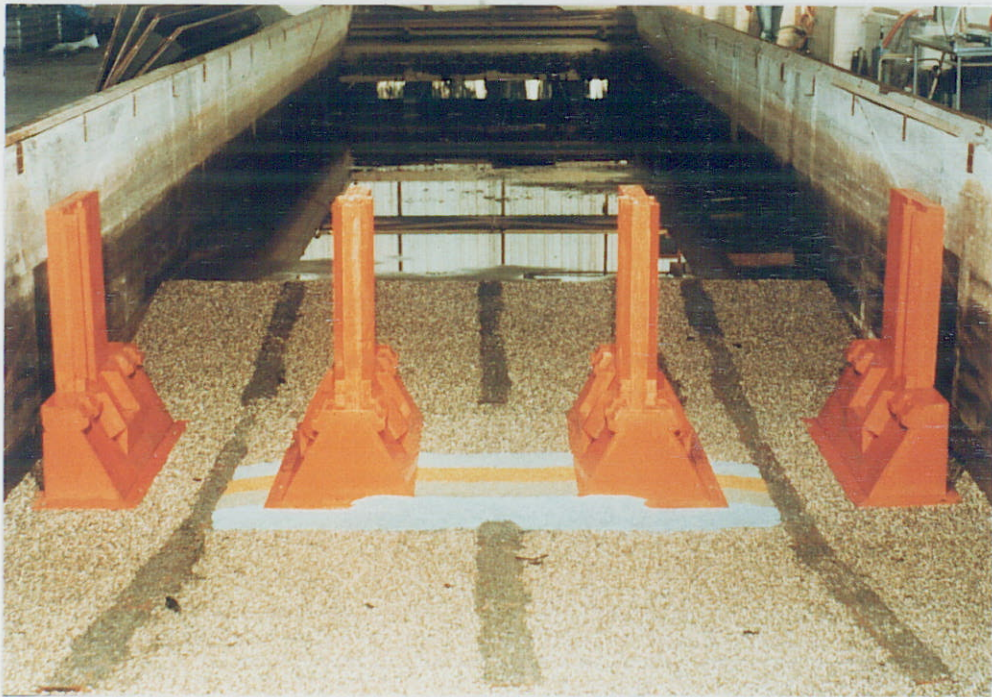
BEGIN VAN BEWEGING



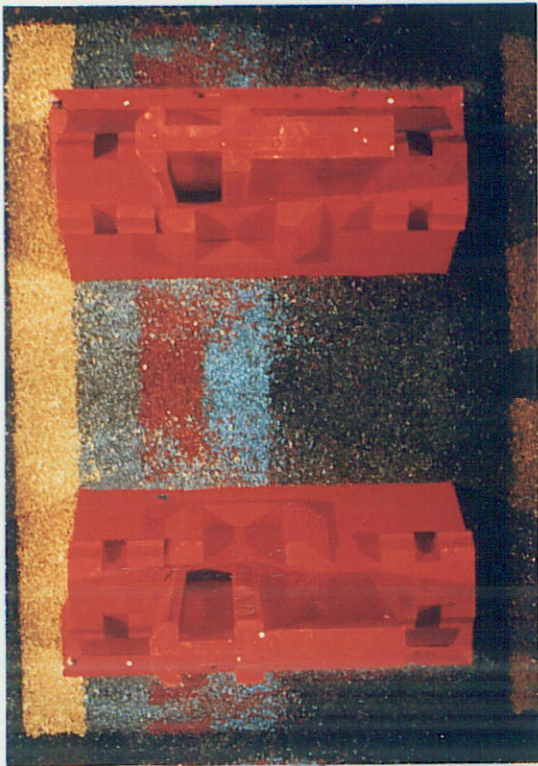
RELATIE SCHADE - KUILDIEPTE



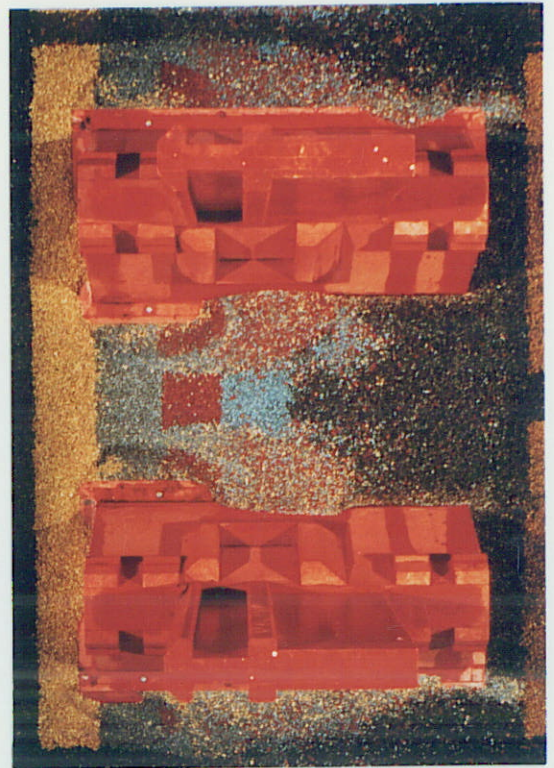
1 OVERZICHT STROMEND MODEL



2 OVERZICHT MODEL MET VERDIEPING VAN 10 M

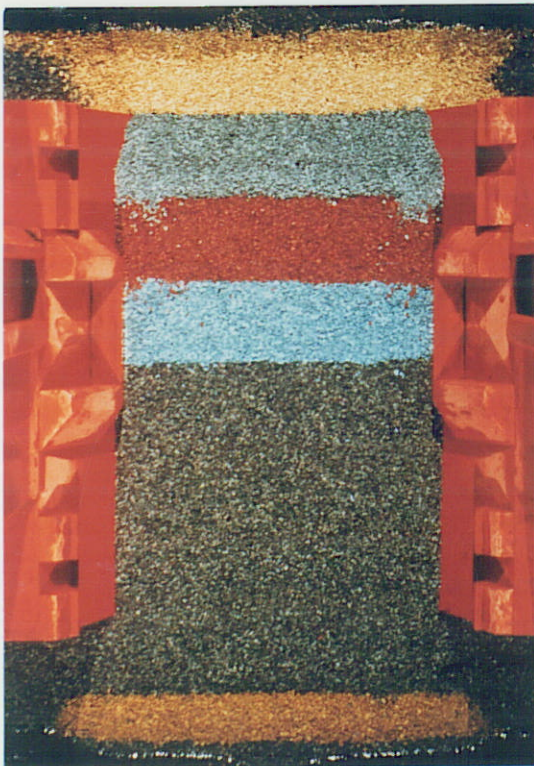


3 $u_A = 2,08 \text{ m/s}$

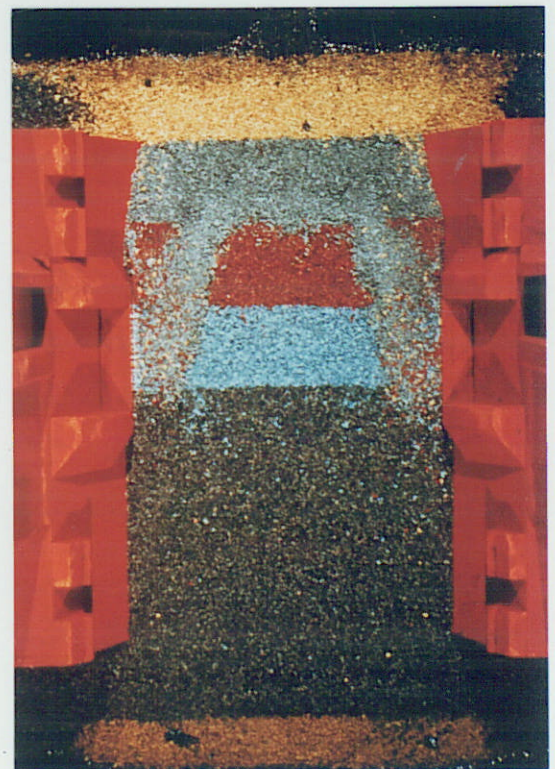


4 $u_A = 2,41 \text{ m/s}$

T2 , OPBOUWFASE 1 EN 2

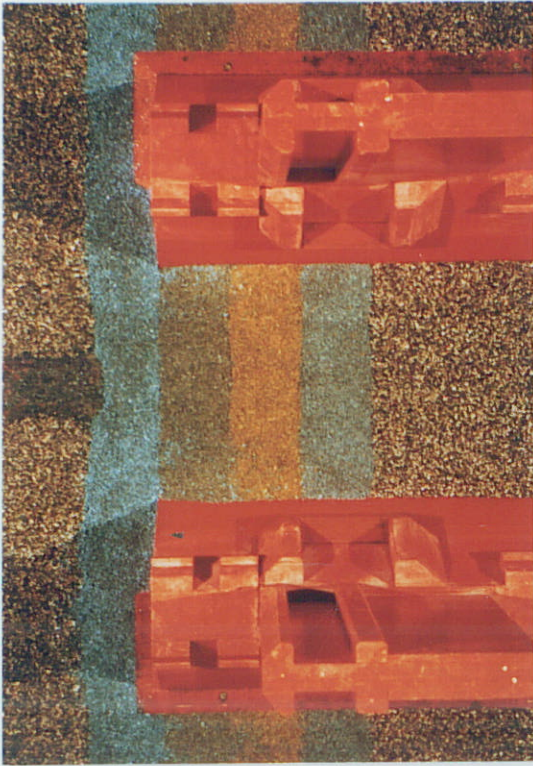


5 $u_A = 1,75 \text{ m/s}$

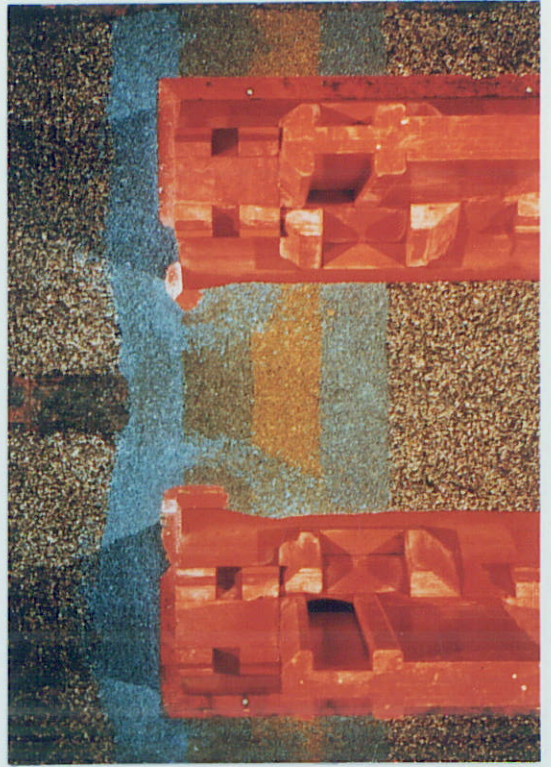


6 $u_A = 2,25 \text{ m/s}$

T2 , OPBOUWFASE 3



7 $u_A = 2,95 \text{ m/s}$

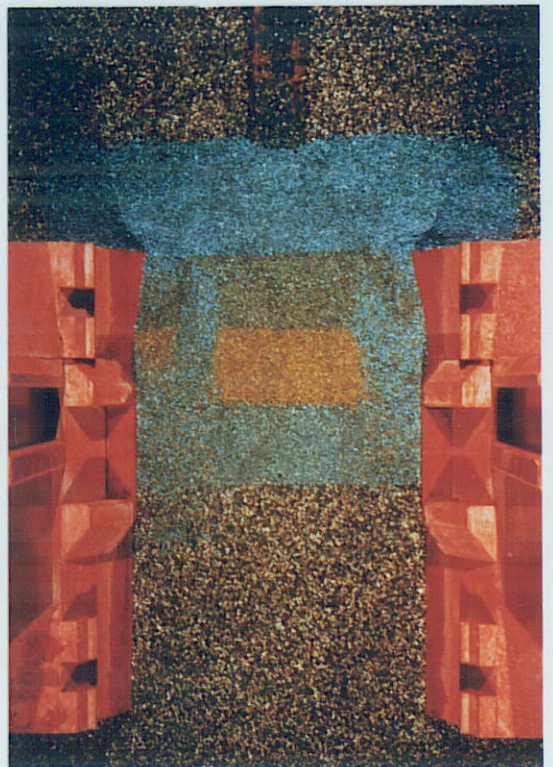


8 $u_A = 3,23 \text{ m/s}$

T3, OPBOUWFASE 1 EN 2

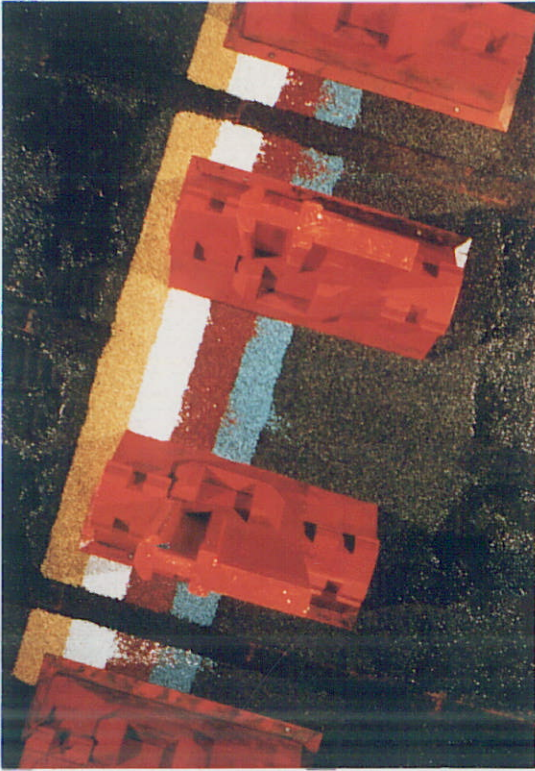


9 $u_A = 2,70 \text{ m/s}$

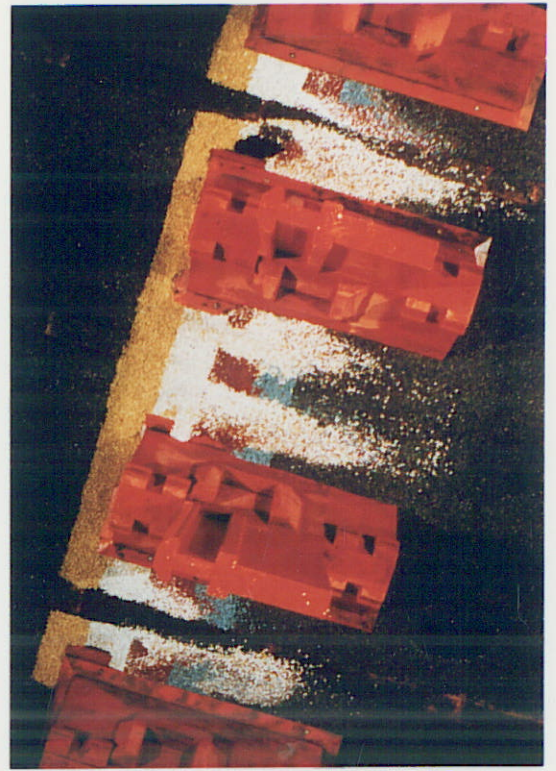


10 $u_A = 3,16 \text{ m/s}$

T3, OPBOUWFASE 3

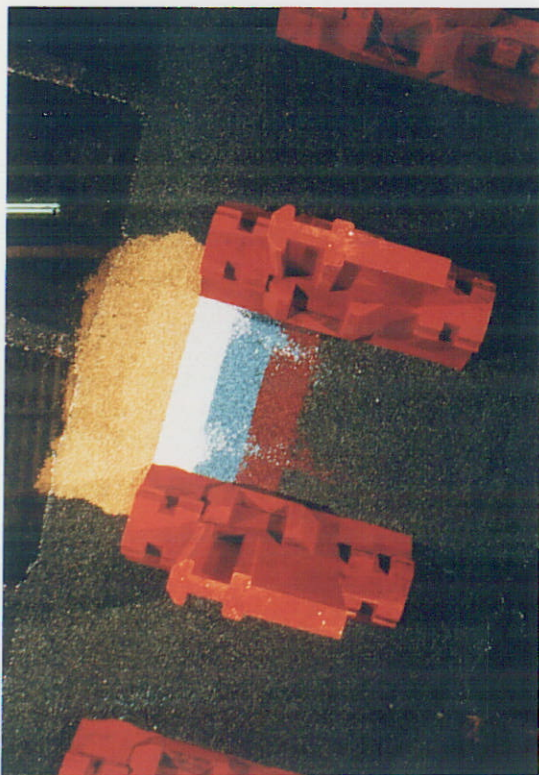


11 $u_A = 1,71 \text{ m/s}$

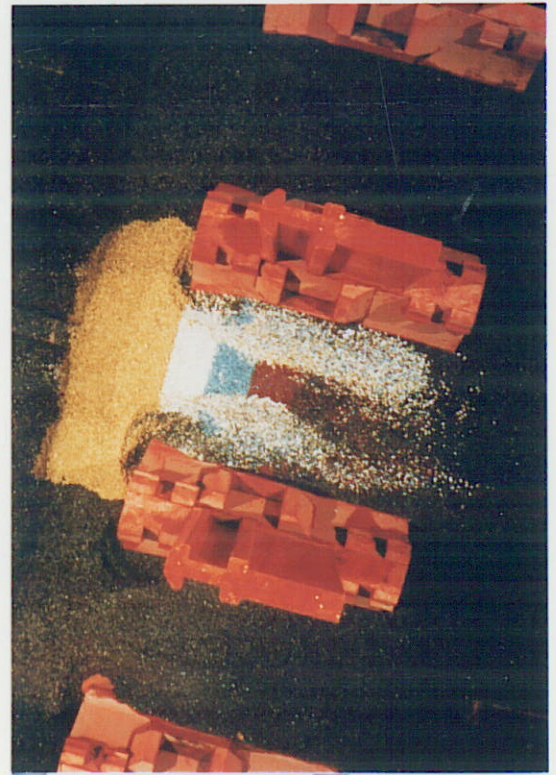


12 $u_A = 2,28 \text{ m/s}$

T4 , OPBOUWFASE 1 EN 2

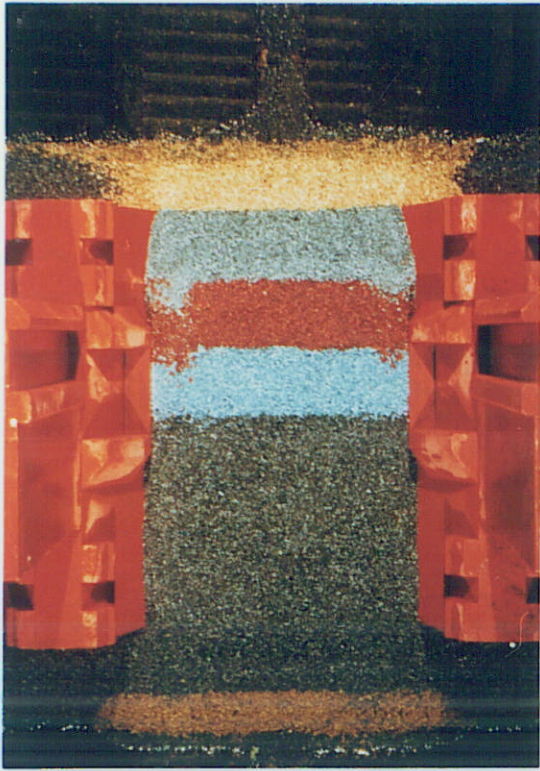


13 $u_A = 1,72 \text{ m/s}$

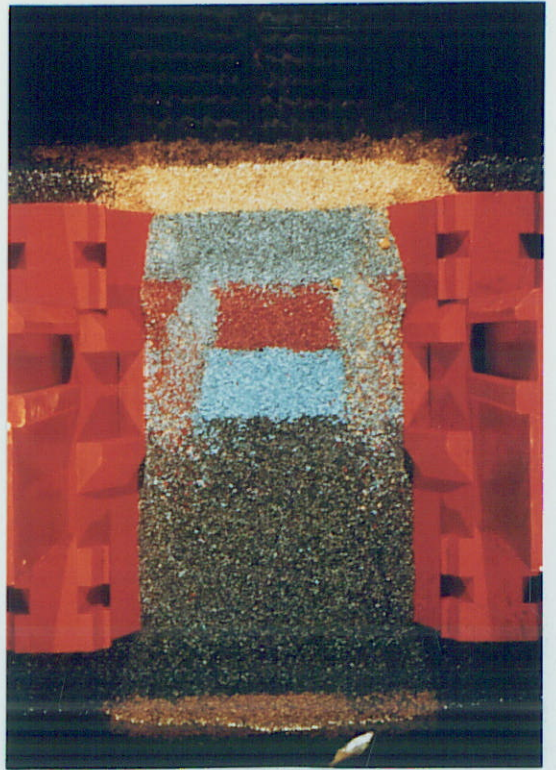


14 $u_A = 2,30 \text{ m/s}$

T4 , OPBOUWFASE 3

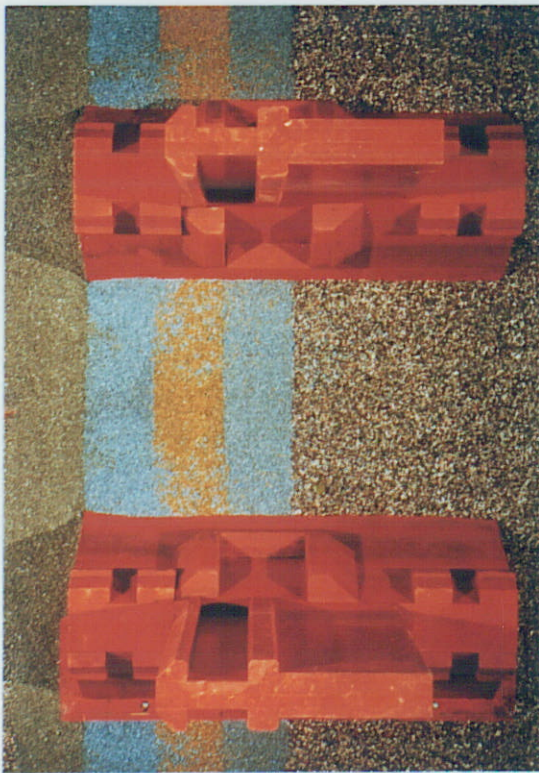


15 $u_A = 1,77 \text{ m/s}$

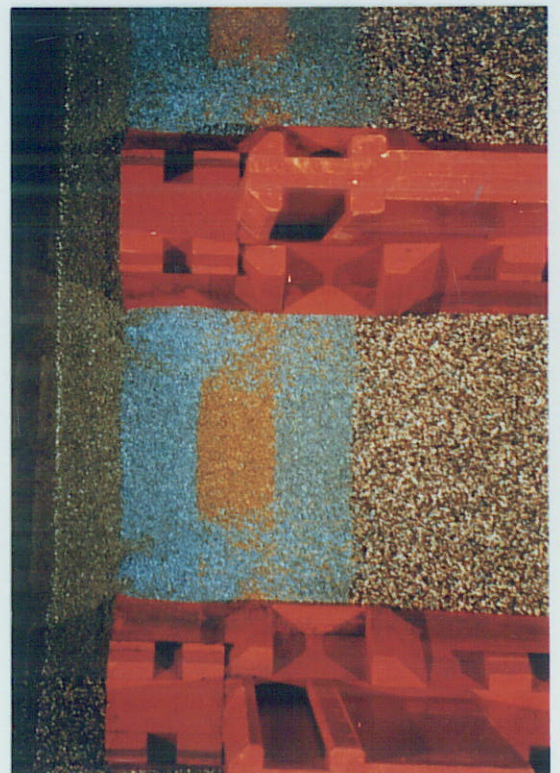


16 $u_A = 2,12 \text{ m/s}$

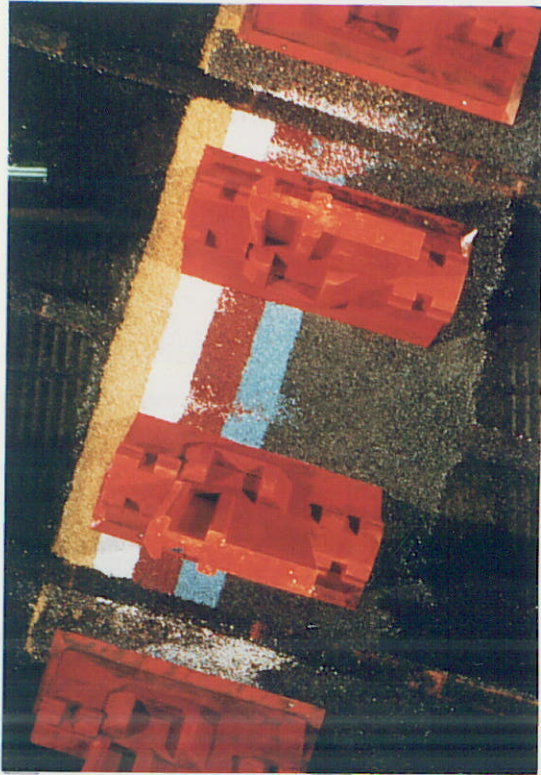
T5, OPBOUWFASE 3



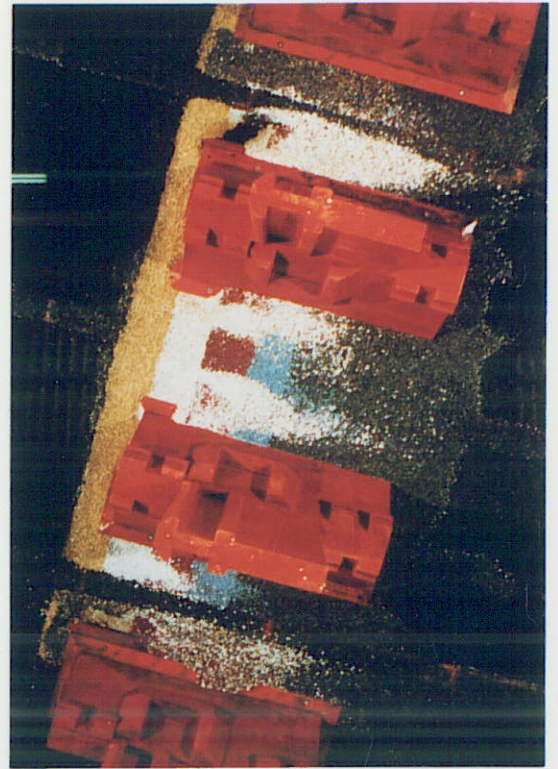
17 T6, OPBOUWFASE 1 EN 2
 $u_A = 2,72 \text{ m/s}$



18 T6, OPBOUWFASE 3
 $u_A = 2,83 \text{ m/s}$

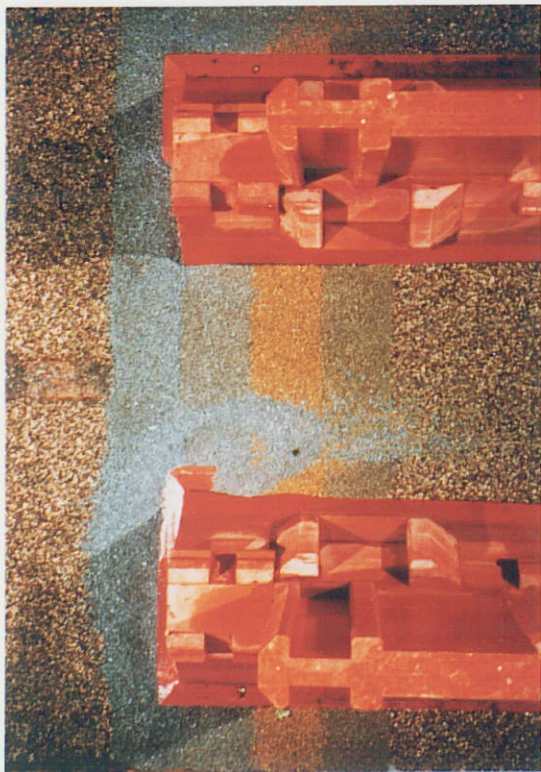


19 $u_A = 1,75 \text{ m/s}$

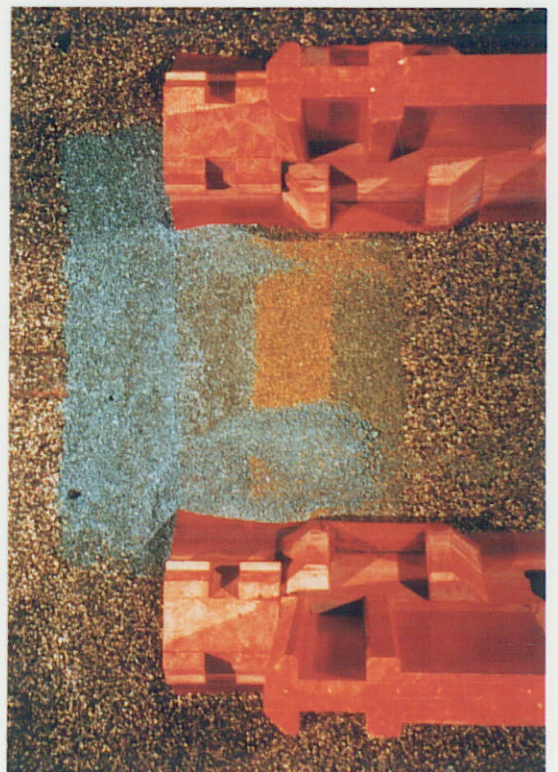


20 $u_A = 2,42 \text{ m/s}$

T7, OPBOUWFASE 1 EN 2



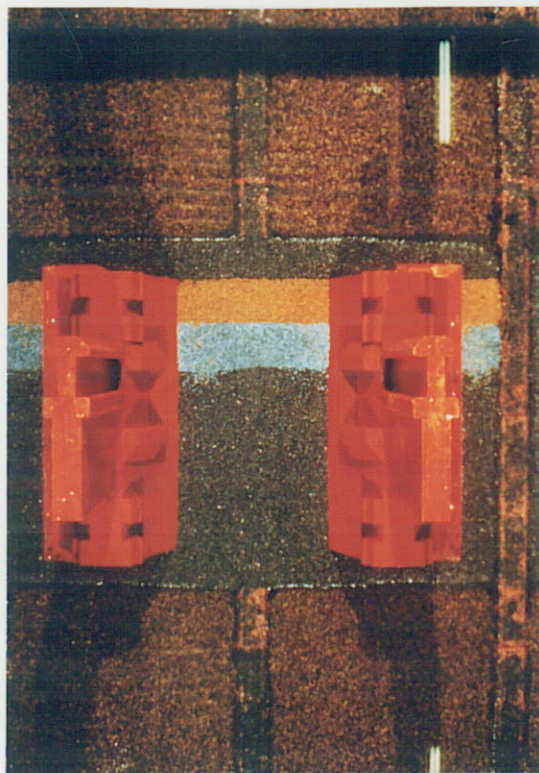
21 T8, OPBOUWFASE 1 EN 2
 $u_A = 3,30 \text{ m/s}$



22 T8, OPBOUWFASE 3
 $u_A = 3,18 \text{ m/s}$



23 T9, BEPALING k_B , $u_A = 2,96$ m/s



24 T11, BESTORTING VAK 1
 $u_A = 2,91$ m/s

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands