

SYSTEMATISCH ONDERZOEK NAAR  
TWEE- EN DRIEDIMENSIONALE  
ONTGRONDINGEN

VERSLAG MODELONDERZOEK

BAND I

*Handwritten note:* band 1 in 3 delen

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM  
DELFT

M 648 / M 863

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Systematisch onderzoek naar  
twee- en driedimensionale ontgroningen

Band I

Tekst, figuren en bijlagen voorstudies

M 648/863

april 1972



## INHOUD

	blz.
<u>1. Inleiding</u>	
1.1. Historisch overzicht van het onderzoek.....	1
1.2. Probleemstelling en konklusies.....	5
<u>2. Voorstudies</u>	
2.1. Stroombeeld en ontgrondingsproces .....	10
2.2. Gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen .....	17
2.3. Begin van beweging van bodemmateriaal .....	24
<u>3. Tweedimensionaal onderzoek (M 648)</u>	
3.1. Inrichting en uitvoering van de proeven .....	34
3.2. Overzicht van de verrichte proeven .....	36
3.3. Resultaten van het onderzoek .....	38
3.3.1. Verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd.....	38
3.3.2. Invloed van de stroomsnelheid op de ontgron- dingstijd.....	42
3.3.3. Invloed van het bodemmateriaal op de ont- groningstijd .....	49
3.3.4. Invloed van de waterdiepte op de ontgrondings- tijd .....	52
3.3.5. Invloed van geometrie en aanstroomkondities ..	56
3.3.6. Kuilvormen en aanzethellingen.....	58

#### 4. Driedimensionaal onderzoek (M 863)

4.1. Inrichting en uitvoering van de proeven.....	66
4.2. Overzicht van de verrichte proeven .....	69
4.3. Resultaten van het onderzoek .....	71
4.3.1. Algemeen beeld van het ontgrondingspatroon ..	71
4.3.2. Invloed van de ontgrondingskuil op de stroom- verdeling.....	73
4.3.3. Verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd .....	79
4.3.4. Invloed van stroomsnelheid, bodemmateriaal, waterdiepte en geometrie op de ontgrondings- tijd.....	86
4.3.5. Konsekwenties van de tijdschaalformule voor het ontgrondingsbeeld.....	89
4.3.6. Ontgrondingsverloop en kuilprofielen op ver- schillende plaatsen in het dwarsprofiel .....	94

#### 5. Samenvatting van de resultaten

5.1. Kenmerkende grootheden voor plaatselijke ontgroningen	102
5.2. Tijdsafhankelijkheid.....	103
5.3. Afhankelijkheid van de geometrie .....	104
5.4. Afhankelijkheid van stroom en bodemmateriaal.....	106
5.5. Reikwijdte en geldigheid van de uitkomsten .....	108

## 6. Beschouwing van de beperkingen

6.1. Weinig gegraadeerd loskorrelig bodemmateriaal.....	113
6.2. Vlakke horizontale bodem.....	114
6.3. Permanente stroom.....	115
6.4. Geen materiaaltransport bovenstrooms.....	123
6.5. Begrensde variatie schaalfactoren .....	126

## 7. Toepassingen

7.1. Specifiek modelonderzoek.....	129
7.2. Voorbeeld: zuidelijk sluitgat Brouwershavense Gat.....	132

<u>Literatuur</u> .....	147
-------------------------	-----

## FIGUREN

1. Karakterisering van een ontgrondingskuil met behulp van de grootheden  $\beta$  en  $h_{\max}$ .
2. Schematisch beeld van het ontgrondingsproces.
3. Vertikale snelheids- en turbulentieverdeling in een ontgrondingskuil.
4. Beeld van het materiaaltransport in een ontgrondingskuil.
5. Ontwikkeling van kuildiepte, bodemsnelheid en -turbulentie op een bepaalde plaats.
6. Gedrag van het diepste punt van de kuil tijdens het ontgrondingsproces.
7. Bij het ontgrondingsproces in aanmerking te nemen grootheden.
8. Situaties waarbij de gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen is onderzocht.
9. Verloop van de ontgrondingsdiepte als functie van tijd en plaats.
10. Krachtenspel tussen stroom en bed.
11. Diagram van Moody.
12. Verdeling gootprofiel in invloedsgebieden voor wanden en bodem.
13. Verband tussen  $\psi_{kr}$  en  $Re_{*}$  bij diverse criteria.
  
14. Overzicht van de onderzochte situaties (M 648).
15. Maximale ontgrondingsdiepte als functie van de tijd (tweedimensionaal).
16. Ontgrondingsprofielen bij konstante verhoudingen van  $t/t_1$ .
- 17.. Invloed van de korreldiameter op de ontgroningstijd.
18. Aangehouden criterium voor het begin van beweging.
19. Verband tussen  $t_1$  en  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$ .
20. Weergave van de materiaalinvloed op de ontgroningstijd.
21. Verband tussen  $t_1/\Delta^{1,7}$  en  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$ .
22. Verband tussen  $t_1/h_o^2$  en  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$ .
23. Verband tussen  $t_1/\Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$ .
24. Invloed van de geometrie op  $\alpha$ .
25. Kuilvormen bij diverse bodemmateriële.
26. Kuilvormen bij diverse waterdiepten.
27. Kuilvormen bij diverse drempelhoogten.
28. Kuilvormen bij diverse ruwheden van de bodembescherming.
29. Aanzetellingen bij diverse materialen, waterdiepten en geometriën.
  
30. Overzicht van de onderzochte situaties (M 863).
31. Algemeen beeld van het driedimensionale ontgrondingspatroon.
32. Stroomverdelingen bij diverse debieten (vaste horizontale bodem).
33. Stroomverdelingen bij vaste horizontale bodem en bij vastgelegde ontgrondingskuil.

34. Stroomverdelingen bij diverse gootafmetingen (vaste horizontale bodem).
35. Langs- en dwarsdoorsneden over het diepste punt van de wervelstraatkuil voor diverse ontgrondingstijden.
36. Tijdontgrondingsrelaties voor de drie onderzochte geometrieën.
37. Tijdontgrondingsrelaties voor diverse materialen.
38. Tijdontgrondingsrelaties voor diverse gootafmetingen.
39. Verband tussen  $t_1 / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$ .
40. Verband tussen  $t_{1/2} / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$ .
41. Ontgrondingsbeeld voor diverse materialen.
42. Ontgrondingsbeeld voor diverse gootafmetingen.
43. Tijdontgrondingsrelaties op drie plaatsen in het dwarsprofiel ( $D/h_o = 0$ ).
44. Tijdontgrondingsrelaties op drie plaatsen in het dwarsprofiel ( $D/h_o = 0,3$ ).
45. Tijdontgrondingsrelaties op drie plaatsen in het dwarsprofiel ( $D/h_o = 0,6$ ).
46. Kuilvormen op diverse plaatsen in het dwarsprofiel.
  
47. Korrelatie tussen gemeten en berekende waarden van  $t_1$ .
48. Verloop van  $h_{max}$  bij stapsgewijs variërende stroomcondities.
49. Verloop van  $h_{max}$  bij cyclisch variërende stroomcondities.
50. Situatie zuidelijk sluitgat Brouwershavense Gat.
51. Sluitgatprofiel met onderzochte bouwfasen.
52. Ontgrondingsprofielen en tijdontgrondingslijn wintersluitgat, raai 150 (eb).
53. Ontgrondingsprofielen en tijdontgrondingslijn wintersluitgat, raai 600 (eb).
54. Sluitingsprogramma's waarvoor de ontgrondingen zijn berekend.
55. Debietverloop bij sluitingsprogramma b1.
56. Waterstandsverloop bij sluitingsprogramma b1.
57. Prototype-tijdontgrondingslijnen, sluitingsprogramma b1, raai 480 (vloed).
58. Te verwachten maximale ontgrondingsdiepten bij sluitingsprogramma b1 (eb).
59. Te verwachten maximale ontgrondingsdiepten bij sluitingsprogramma b1 (vloed).
60. Geschematiseerde kuilprofielen, sluitingsprogramma b1 (vloed).



## BIJLAGEN VOORSTUDIES

(opgenomen in band I)

- I-1. Ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, serie 1,  $q = 160 \text{ l/s.m'}$ .  
I-2. idem , serie 1,  $x = 50 \text{ cm}$ .  
I-3. Verband tussen A en  $x/h_o$ , serie 1.  
I-4. idem serie 2.  
I-5. idem serie 3.  
I-6. idem serie 4.  
I-7. Verband tussen  $t_o$  en  $x/h_o$ , serie 1.  
I-8. idem serie 2.  
I-9. idem serie 3.  
I-10. idem serie 4.  
I-11. Meetopstelling bij de proeven ter bepaling van het begin van beweging.  
I-12. Stroomkondities bij begin van beweging, polystyreen  $1600 \mu\text{m}$ .  
I-13. idem polystyreen  $2400 \mu\text{m}$ .  
I-14. idem bakeliet  $610 \mu\text{m}$ .  
I-15. idem bakeliet  $1800 \mu\text{m}$ .  
I-16. idem zand  $130 \mu\text{m}$ .  
I-17. idem zand  $220 \mu\text{m}$ .  
I-18. idem zand  $330 \mu\text{m}$ .  
I-19. idem zand  $580 \mu\text{m}$ .  
I-20. idem zand  $925 \mu\text{m}$ .  
I-21. idem zand  $1600 \mu\text{m}$ .  
I-22. idem zand  $2200 \mu\text{m}$ .  
I-23. Vertikale snelheidsverdeling bij begin van beweging.  
I-24. Verband tussen  $\psi_{kr}$  en  $Re_*$  en tussen  $u_{*kr}/w$  en  $Re_*$ .

## BIJLAGEN TWEEDIMENSIONAAL ONDERZOEK (M 648)

(opgenomen in band II)

II-1	Overzicht van de verrichte ontgrondingsproeven - M 648
II-2	Korrelverdelingen van de toegepaste bodemmaterialen.
II-3a ... 76a	Meetresultaten ontgrondingsproeven
II-5b ... 76b	Kuilprofielen

## BIJLAGEN DRIEDIMENSIONAAL ONDERZOEK (M 863)

(opgenomen in band III)

III-1	Overzicht van de verrichte ontgrondingsproeven - M 863
III-2	Meetopstelling en toegepaste bodemmaterialen
III-3a ... 26a	Meetresultaten ontgrondingsproeven
III-3b ... 26b	Ontgrondingsbeelden
III-3c ... 26c	Kuilprofielen

# SYSTEMATISCH ONDERZOEK

## NAAR TWEE- EN DRIEDIMENSIONALE ONTGRONDINGEN

### 1. Inleiding

#### 1.1. Historisch overzicht van het onderzoek

Na een kort oriënterend overleg vooraf werd op 25 september 1958 door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium bij brief no. 9752 opdracht gegeven tot een onderzoek naar de vormgeving van afsluitdammen, speciaal in verband met ontgrondingen op en achter het onverdedigde benedenstroomse talud van de dam. Dit onderzoek werd in het Laboratorium Delft ter hand genomen onder het modelnummer M 648.

Nadat enkele proevenseries waren uitgevoerd, waarbij het damprofiel werd gevarieerd, en geruime tijd aandacht was besteed aan de bestudering van het stroombeeld en het meten van stroomsnelheden en turbulentie-intensiteiten, werd in juni 1960 besloten het onderzoek te splitsen in twee afzonderlijke delen, namelijk een meer fundamenteel onderzoek naar het mechanisme van ontgrondingen achter kunstwerken, waarbij de interpretatie van modelproeven het belangrijkste doel vormde, en daarnaast een meer praktisch gericht onderzoek naar de invloed van damkonstructie en -profiel op het stroombeeld, dat in de eerste plaats tot doel had ontwerpkriteria te leveren. Het fundamentele ontgrondingsonderzoek werd voortgezet onder modelnummer M 648; de resultaten hiervan vormen een onderdeel van dit verslag. Het praktische stroombeeldonderzoek groeide in de loop van de tijd uit tot het omvangrijke onderzoek naar geleidelijke sluitingen. Hiervan is, los van het ontgrondingsonderzoek, verslag uitgebracht onder modelnummer M 731.

In de loop van 1961 kwam het ontgrondingsonderzoek goed op gang. Niet alleen werd het experimentele werk voortgezet en uitgebreid, maar daarnaast werd dieper ingegaan op de fysische achtergronden van het ontgrondingsproces in een turbulente stroom. Dit theoretische werk vond plaats in samenwerking met Prof. ir. J. O. Hinze, die als adviseur bij het onderzoek was betrokken en van wiens hand in de jaren 1961 en 1962 een negental notities verschenen over diverse aspecten van het zandtransport door turbulentie [1]. Daarnaast konden uit de resultaten van de proeven enkele belangrijke empirische relaties worden afgeleid, die een beschrijving geven van de ontgrinding als functie van plaats en tijd. Hiermee was in principe de mogelijkheid om ontgrondingen op schaal te reproduceren aangetoond en daarmee de basis gelegd voor het verdere onderzoek.

Dit verdere onderzoek kreeg als logisch uitvloeisel van het voorafgaande, het karakter van een schaalonderzoek. Nadat in 1962 een nieuwe, bredere goot ter be-



schikking was gekomen, werden dan ook grote reeksen schaalproeven ondernomen, waarbij achtereenvolgens de diverse parameters van stroom en ontgrondingsmateriaal werden gevarieerd en onder die verschillende kondities het verloop van de ontgroning met de tijd werd bestudeerd. Het moeilijkste bleek de invloed van de stroomsnelheid op de ontgroning te karakteriseren, maar nadat ook hiervoor een bevredigende uitdrukking was gevonden kon een algemeen geldende schaalrelatie worden opgesteld, waaraan alle meetresultaten in principe voldeden. Deze resultaten werden gedurende 1963 en 1964 in voorlopige vorm in "informaties" vastgelegd, terwijl daarnaast op grond van hetzelfde proevenmateriaal door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst een nota over ontgroningen werd uitgebracht [2]. Met goedvinden van de opdrachtgever werden de laboratoriumresultaten in diverse artikelen en kongresbijdragen gepubliceerd [3, 4, 5 en 6]. Naderhand werden nog enkele aanvullende proeven toegevoegd.

Bij het onderzoek M 648 werden de ontgroningen bestudeerd bij een stroombeeld dat bij benadering als tweedimensionaal kon worden beschouwd, dat wil zeggen dat dwars op de stroomrichting geen of slechts geringe variaties in stroomkondities voorkwamen. Toen dit onderzoek zijn voltooiing begon te naderen, ontstond de behoefte het systematisch ontgrondingsonderzoek uit te breiden naar stroomomstandigheden met driedimensionaal karakter, waarbij ook wervelstraten een rol spelen.

De opdracht tot een dergelijk "driedimensionaal ontgrondingsonderzoek" werd door Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium verstrekt in brief no. 10894 d.d. 10 december 1964. De oorspronkelijke opzet ging uit van ontgrondingsproeven bij drie verschillende configuraties en een programma dat zoveel mogelijk zou aansluiten bij het reeds uitgevoerde tweedimensionale onderzoek. Het onderzoek, onder modelnummer M 863, kon ten dele in Delft worden uitgevoerd, waar het werd ingepast in het kader van het systematisch onderzoek naar bodembeschermingen (M 847), ten dele moest er nieuwe akkomodatie voor worden geschapen, die in het Laboratorium De Voorst in de vorm van een 10 meter brede goot werd gerealiseerd.

Door de verstrengeling van ontgrondingsonderzoek en onderzoek naar bodembeschermingen enerzijds en de geografische scheiding in onderzoek-Delft en onderzoek-De Voorst anderzijds is de gewoonte ontstaan het in Delft uitgevoerde deel van het driedimensionale ontgrondingsonderzoek aan te duiden met het modelnummer M 847. Aangezien deze aanduiding echter aanleiding kan geven tot verwarring, is inmiddels de oorspronkelijke indeling hersteld en zal voortaan met M 847 het systematisch onderzoek naar bodembeschermingen worden bedoeld, en met M 863 het systematisch ontgrondingsonderzoek bij driedimensionale stroombeelden. In dit verslag worden de resultaten van het onderzoek M 863 gepresenteerd, als vervolg van en in samenhang met het tweedimensionale onderzoek M 648. De resultaten van het onderzoek M 847 zullen in afzonderlijke verslagen worden gebundeld.

Evenals bij het tweedimensionale onderzoek speelden bij het driedimensionale ontgrondingsonderzoek twee doelstellingen doorelkaar, namelijk enerzijds de wens op korte termijn gegevens te verkrijgen waaraan ontwerpkriteria konden worden ontleend, anderzijds de toetsing en eventuele uitbreiding van de reeds gevonden schaalrelaties, wat duidelijk een werk van langere adem inhield. Tot een splitsing in een meer fundamenteel en een meer praktisch gericht gedeelte, zoals bij het tweedimensionale onderzoek, kwam het echter niet, met het gevolg dat een onderzoekprogramma werd gevolgd waarbij aanvankelijk aan de vragen betreffende praktische ontwerpproblemen prioriteit werd verleend, maar geleidelijk aan de nadruk steeds meer werd verschoven in de richting van het schaalonderzoek.

De praktische vragen betroffen in hoofdzaak de invloed van de vormgeving van een sluitgat op het ontgrondingsproces. De belangrijkste elementen die voor onderzoek in aanmerking kwamen en in het kader van M 847 ook al in een tweedimensionaal stroombeeld waren bekeken, waren de lengte en de ruwheid van de bodemverdediging en de relatieve hoogte van dam of drempel; daarnaast speciaal in het driedimensionale geval de beëindiging van de konstruktie, die de wervelstraat veroorzaakt. In kwalitatieve zin kon op verscheidene van deze vragen een antwoord worden gegeven. Naarmate duidelijker werd, dat een meer gedetailleerde bepaling van de geometrie-invloed het beste kan plaatsvinden aan de hand van konkrete gevallen en zich minder leent voor een systematische benadering wegens de onbegrensde variatie-mogelijkheden, won de bestudering van de invloed van stroomsnelheid, materiaaleigenschappen en lengteschaal aan belang, daar de uitkomsten hiervan voor de interpretatie van specifiek ontgrondingsonderzoek onmisbaar zijn.

De gedachte ook de invloed van de samentrekking op de ontgroning te bestuderen was, ondanks het feit dat het bij ontgroningen principieel ontoelaatbaar is de vertikale schaal anders te kiezen dan de horizontale schaal, oorspronkelijk toch opgenomen in de opzet van het proevenprogramma, omdat het aantrekkelijk geacht werd in een (meestal samengetrokken) overzichtsmiddel verkennend ontgrondingsonderzoek te kunnen verrichten. In de loop van de tijd is deze gedachte op de achtergrond geraakt en het realiteitsgehalte van een samentrekkingsonderzoek voor ontgroningen sterk gerelativeerd, waardoor het tenslotte als minder interessant punt van het programma is afgevoerd.

Nadat het onderzoek zich in de jaren 1965 en '66 op de bovenbeschreven wijze had ontwikkeld, werden de jaren 1967 en '68 besteed aan een intensief schaalonderzoek. Daarbij werd, wat de geometrie betreft, alleen de damhoogte nog als variabele gehandhaafd, en wel in drie varianten. Veel aandacht werd geschonken aan de technische uitvoering van de proeven om de vergelijkbaarheid van de diverse schaalvariëaties zo groot mogelijk te doen zijn. Dit vond onder meer zijn uitdrukking in de aanschaf van twee echoloodinstallaties, één in Delft en één in De Voorst, waarmee de nauwkeurigheid



en de reproduceerbaarheid van de metingen merkbaar werd bevorderd en de hoeveelheid informatie sterk kon worden uitgebreid. Ook de opzet van het gehele meetsysteem en de uitvoering van de snelheidsmetingen werden kritisch bezien. In deze periode werden de eerste resultaten van het onderzoek geordend en in een publikatie verwerkt [7].

Al doende begon de overtuiging veld te winnen, dat het ontgrondingsproces bij een driedimensionaal stroombeeld op fundamenteel overeenkomstige wijze beschreven kan worden als het tweedimensionale ontgrondingsproces. Deze overtuiging werd gedurende de laatste episode van het onderzoek in 1969 nader geverifieerd en tenslotte door de verkregen onderzoekresultaten bevestigd, zodat voor het ontgrondingsproces een algemene beschrijvingswijze kon worden geïntroduceerd, die zowel op de resultaten van het tweedimensionale als het driedimensionale onderzoek kon worden toegepast. Hierbij verschijnt de tweedimensionale situatie als bijzonder geval van het algemene driedimensionale geval.

Eveneens in 1969 vond nog een speciale studie plaats naar het begin van beweging van de bij het ontgrondingsonderzoek gebruikte bodemmaterialen, aangezien een juiste keuze van de kritieke stroomsnelheid waarbij het materiaal in beweging komt voor de uiteindelijke formulering van de afgeleide relaties van belang bleek te zijn. In de loop van dit zelfde jaar zagen twee "informaties" het licht, waarin enkele onderdelen van het onderzoek in voorlopige vorm werden vastgelegd.

Aangezien inmiddels de tijd rijp werd geacht de uitkomsten van het gehele onderzoek, twee- en driedimensionaal in een samenvattend verslag aan de opdrachtgever aan te bieden en na al die jaren van onderzoek aan een dergelijk verslag grote behoefte werd gevoeld, werd besloten het onderzoek voorlopig af te sluiten en tot definitieve uitwerking en samenvatting van de resultaten over te gaan. In dit verslag is gepoogd de grote hoeveelheid materiaal op overzichtelijke wijze bijeen te brengen en volledigheid met duidelijkheid te verenigen. Het verslag is daartoe ingedeeld in drie banden, waarvan de eerste band de tekst bevat en de voor het begrip en de beoordeling noodzakelijke figuren; de tweede band vormt een bijlage met de details van het tweedimensionale onderzoek M 648 en de derde band een soortgelijke bijlage bij het driedimensionale onderzoek M 863.

Met het verschijnen van dit verslag zijn de als voorlopig bedoelde "informaties" M 648 - I t/m 24 en M 847/M 863 - I en II als informatiebron overbodig geworden en ten dele achterhaald. Zij kunnen daarom als archiefstukken worden beschouwd.

Een groot aantal personen is in de loop van de afgelopen dertien jaar bij het ontgrondingsonderzoek betrokken geweest. De directe leiding van het onderzoek M 648

heeft achtereenvolgens berust bij ir. G. Verbrugh, ir. A.P.H. v. Baardewijk, ir. Z. Kovács en ir. H.N.C. Breusers, welke laatste verreweg het belangrijkste aandeel in het onderzoek heeft gehad. Bij de voorbereiding en begeleiding van het onderzoek waren betrokken ir. J.G.H.R. Diephuis en ir. A. Paape, terwijl aan de besprekingen met Prof. Hinze werd deelgenomen door de irs. J.E. Prins, P.A. Kolkman, M. de Vries en G. Abraham. Het onderzoek M 863 stond achtereenvolgens onder leiding van ir. A. Woestenenk, ir. T. v.d. Meulen en ir. W.H.P. Schukking, terwijl ir. J.J. Vinjé bij opzet en voortgang van het onderzoek ten nauwste betrokken was. Niet onvermeld mag blijven het belangrijke aandeel dat de heren R. Adihardjo en B.P. Swint in het uitvoerende werk hebben gehad, terwijl naast hen een groot aantal medewerkers van het Laboratorium direkt of indirekt aan het onderzoek hun bijdrage hebben geleverd.

Met Rijkswaterstaat werd voortdurend contact onderhouden, speciaal met de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst. Van deze zijde waren als initiatiefnemers bij het onderzoek betrokken ir. W.C. Bischoff v. Heemskerck, ir. W.A. Venis en ir. H. v.d. Tuin, later gevolgd door ir. K.F. Valken, dr. J.J. Dronkers, ir. F. Roelofs en ir. F. Spaargaren, welke laatste met ir. Venis zich in het bijzonder met de problematiek van de ontgrondingen heeft bezig gehouden.

Een belangrijk deel van de gedachtenvorming heeft plaatsgevonden in het onderlinge overleg tussen Laboratorium en opdrachtgever. De resultaten vermeld in dit verslag, dat is samengesteld door ir. W.H.P. Schukking, vormen de vrucht van deze samenwerking.

## 1.2. Probleemstelling en konklusies

Bij de aanleg van bodembeschermingen, al dan niet in combinatie met constructies tot afsluiting van zeegaten of andere waterlopen, treedt aan de benedenstroomse zijde uitschuring van de bodem op. De optredende ontgroning kan de stabiliteit van de constructie in aanbouw, en mogelijk ook van oevers of andere bouwwerken, in gevaar brengen, afhankelijk van vorm en grootte van de ontgrondingskuil en de grondmechanische gesteldheid van de bodem in de direkte omgeving daarvan.

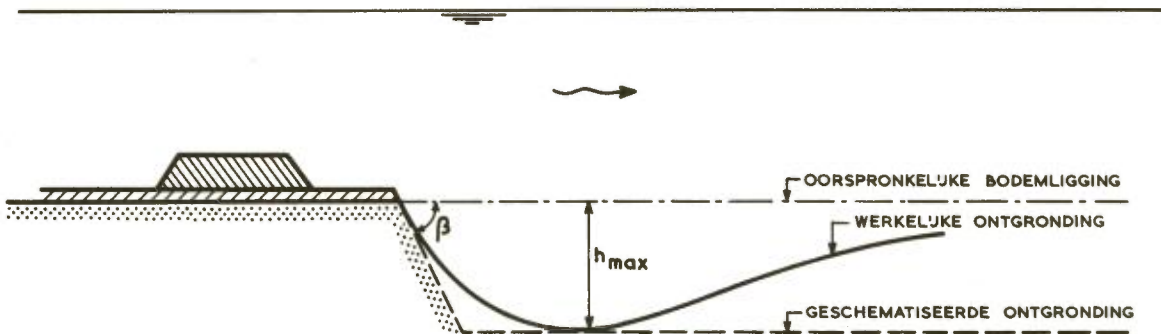
Vorm en grootte van de ontgrondingskuil zijn sterk tijdsafhankelijk: aanvankelijk ontwikkelt de ontgroning zich snel, maar het tempo neemt steeds meer af, totdat uiteindelijk een evenwichtstoestand wordt bereikt. In geval de uitvoering van het werk of een bepaalde maatgevende fase daarvan minder tijd in beslag neemt dan nodig is om de evenwichtsontgroning te bereiken, wat bij de afsluiting van zeegaten als regel geldt, is het niet voldoende de eindtoestand te kennen, maar moet de gehele ontwikkeling van de ontgroning bekend zijn. Het verloop van dit ontgrondingsproces is theoretisch nog niet toegankelijk; het kan dus alleen via de weg van het experiment worden bepaald,



terwijl ook de factoren die het verloop beïnvloeden experimenteel moeten worden afgeleid.

In deze situatie is men voor de oplossing van concrete problemen aangewezen op hydraulisch modelonderzoek. Hierbij observeert en meet men de verschijnselen, die optreden in een van de gegeven situatie afgeleid schaalmodel. Voor de interpretatie van deze metingen en de omzetting daarvan in een voorspelling van de gebeurtenissen in werkelijkheid dient men de algemene schaalwetmatigheden te kennen die het bestudeerde verschijnsel beheersen. Deze wetmatigheden voor ontgrondingsverschijnselen af te leiden was het doel van het systematisch ontgrondingsonderzoek.

Uit het verrichte onderzoek blijkt, dat het verloop van het ontgrondingsproces afhankelijk is van de aard van het bodemmateriaal, de sterkte, turbulentie en diepte van de waterstroom en de geometrie van waterloop en te bouwen constructie. De ontgroning wordt daarbij gekarakteriseerd door de maximale diepte van de ontgrondingskuil en de aanzethelling daarvan, met welke parameters een willekeurig kuilprofiel is te schematiseren tot een grondmechanisch meest ongunstig (en dus veilig) profiel, zoals in figuur 1 is aangegeven.



Figuur 1 Karakterisering van een ontgrondingskuil met behulp van de grootheden  $\beta$  en  $h_{max}$

De parameters  $h_{max}$  en  $\beta$  blijken in elke willekeurige langdoorsnede in de hoofdrichting van de stroom te kunnen worden bepaald door de experimentele relaties:

$$\frac{h_{max}(t)}{h_o} = f_1 \left( \frac{t}{t_1} \right) \quad (1.1.)$$

met

$$t_1 = \frac{250 \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_o^2}{(\alpha \bar{u} - u_{kr})^{4,3}} \quad (1.2.)$$

en

$$\cotg \beta = f_2 \text{ (geometrie)} \quad (1.3.)$$

- waarin:
- $h_{\max}(t)$  = max. ontgrondingsdiepte op het tijdstip  $t$  [m]
  - $h_o$  = oorspronkelijke waterdiepte [m]
  - $t$  = tijd [uren]
  - $t_1$  = tijd waarin  $h_{\max} = h_o$  wordt [uren]
  - $\Delta$  = relatieve dichtheid ontgrondingsmateriaal onder water
  - $\bar{u}$  = gemiddelde stroomsnelheid [m/s]
  - $u_{kr}$  = stroomsnelheid, waarbij het bodemmateriaal juist in beweging komt [m/s]
  - $\alpha$  = dimensieloze koëfficiënt afhankelijk van de geometrie
  - $\beta$  = aanzethelling ontgrondingskuil

De functie  $f_1$  in relatie (1.1.) blijkt binnen zekere grenzen niet te worden beïnvloed door de gemiddelde stroomsnelheid of de eigenschappen van het bodemmateriaal, maar slechts afhankelijk te zijn van de geometrie, evenals de koëfficiënt  $\alpha$ . Ook de aanzethelling van de ontgrondingskuil is vrijwel uitsluitend van de geometrie afhankelijk. In het algemeen is de geometrie-invloed niet zonder meer kwantitatief uit de vormgeving en maatvoering van de gegeven situatie af te leiden, maar moet deze in elk concreet geval uit een speciaal daartoe uit te voeren proef worden bepaald. In het bijzondere geval van een tweedimensionale geometrie echter blijkt het mogelijk de functie  $f_1$  nader te specificeren en uit te drukken door middel van de exponentiële relatie

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o} = \left( \frac{t}{t_1} \right)^{0,38} \quad (1.4.)$$

De grootte  $t_1$ , per definitie de tijdsduur waarin de maximale ontgrondingsdiepte gelijk wordt aan de oorspronkelijke waterdiepte, geeft voor verschillende ontgrondingen bij eenzelfde geometrie de tijdschaal aan, die, zoals uit relatie (1.2.) te zien is, bepaald wordt door stroom, materiaal en geometrie volgens

$$n_t = n_{\Delta}^{1,7} \cdot n_h^2 \cdot n_{(a\bar{u} - u_{kr})}^{-4,3} \quad (1.5.)$$

In verband met de praktische toepasbaarheid van de uitkomsten van het onderzoek bleek het nuttig naast de grootheid  $t_1$  een analoge grootheid  $t_{1/2}$  in te voeren, die gedefinieerd is als de tijdsduur waarin de maximale ontgrondingsdiepte gelijk wordt aan de helft van de oorspronkelijke waterdiepte:  $h_{\max}/h_o = 1/2$ . Wordt bij de uitwerking van een ontgrondingsproef in plaats van  $t_1$  de grootheid  $t_{1/2}$  gebruikt, dan dient in relatie (1.2.) de koëfficiënt 250 te worden vervangen door het getal 75. Voor de tijdschaalrelatie (1.5.) heeft dit geen konsekventies.

Bovengegeven experimentele relaties gelden onder de voorwaarden, dat de bodem benedenstrooms van de verdediging in de stroomrichting aanvankelijk horizontaal is en bestaat uit loskorrelig materiaal zonder sterke gradering, dat de waterbeweging permanent is, en dat geen bodemmateriaal van bovenstrooms wordt aangevoerd. Zij zijn, behalve relatie (1.4.), zowel op tweedimensionale als op driedimensionale ontgrondingen toepasbaar.

Een uitbreiding van de geldigheid tot situaties met niet-permanente stroom is mogelijk onder de veronderstelling dat de niet-permanente waterbeweging beschouwd mag worden als een opeenvolging van oneindig kort durende permanente toestanden. In geval van een getijbeweging kan dan voor de relaties (1.1.) en (1.2.) worden geschreven:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f_1 \left\{ \frac{t}{t_{1\text{getij}}} \right\} \quad (1.6.)$$

met

$$t_{1\text{getij}} = \frac{250 \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_o(0)}{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \frac{\{a\bar{u}(t) - u_{kr}\}^{4,3}}{h_o(t)} dt} \quad (1.7.)$$

waarin: $T$	= duur van de getijperiode	
$T_1$	= tijdstip waarop $\{ \alpha \bar{u}(t) - u_{kr} \}$	positief wordt
$T_2$	= tijdstip waarop $\{ \alpha \bar{u}(t) - u_{kr} \}$	negatief wordt
$h_o(0)$	= waterdiepte op het tijdstip nul	

en uitsluitend de gemiddelde stroomsnelheid  $\bar{u}$  en de waterdiepte  $h_o$  variabel met de tijd zijn gesteld.

In situaties waarin de aanvoer van bodemmateriaal van bovenstrooms niet te verwaarlozen is, geeft toepassing van de gevonden relaties gezien de ervaringen in het prototype een te ongunstig resultaat, in die zin dat de uit modelonderzoek voorspelde ontgroningen relatief te groot zijn. Om in deze gevallen toch tot redelijke uitkomsten te kunnen komen, is door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst een berekeningsmethode ontwikkeld, waarmee door het in aanmerking nemen van het materiaaltransport een bepaalde reductie op de ontgroning kan worden aangebracht [8].

Op deze wijze is het dus mogelijk bij modelproeven waargenomen lokale ontgroningen benedenstrooms van bodembeschermingen en in de stroom geplaatste konstrukties te beschrijven en te interpreteren, zowel naar hun omvang als naar hun ontwikkeling in de tijd. De belangrijkste beperkingen in het systematisch onderzoek, de permanente beweging en de verwaarlozing van materiaalaanvoer, zijn tot nu toe door aanvullende rekenmethoden ondervangen. Het is echter reeds wenselijk geoordeeld op deze punten nadere informatie te verzamelen. Het verdient daarom aanbeveling het systematisch ontgrondingsonderzoek voort te zetten en daarbij te richten op de invloed van de getijbeweging en het initiële materiaaltransport. Bij dit voortgezette onderzoek kan dan op de tot nu toe verkregen grondslag worden verder gebouwd.



## 2. Voorstudies

### 2.1. Stroombeeld en ontgrondingsproces

Observatie van de verschijnselen die zich afspelen wanneer een vloeistof stroomt over een bed van los korrelvormig materiaal - als prototype mag gelden een waterstroom over een zandbed - kan leiden tot twee tegenover elkaar staande ervaringen: enerzijds raakt men enigszins verbijsterd door de gekompliceerdheid van bewegingen en vormenspel, vooral wanneer men tracht deze uit de waarnemingen te ontlezen en te beschrijven; anderzijds raakt men onder de indruk van de harmonie en kennelijke wetmatigheid, zodra men het beweeglijke beeld in zijn totaliteit bekijkt. Bizonder treffend in dit opzicht zijn bijvoorbeeld de sediment-gedragingen onder invloed van golven, of de ribbelpatronen op stranden en rivierbeddingen.

Deze ervaring nodigt er als het ware toe uit om bij de bestudering van dit soort verschijnselen niet onmiddellijk de analytische weg in te slaan, waarbij men wegens de gekompliceerdheid al gauw het gevaar loopt zich in alle mogelijke details te verliezen, maar allereerst te trachten in een meer fenomenologische benadering de karakteristieke kenmerken van het te onderzoeken verschijnsel op het spoor te komen. Terwijl het voor de kwantitatieve oplossing van concrete problemen inzake materiaaltransport in stromend water - waaronder het optreden van lokale ontgrondingen - noodzakelijk is een aantal wiskundige betrekkingen af te leiden waarmee men kan rekenen, kan het namelijk voor het begrip zeer verhelderend zijn eerst tot een meer kwalitatieve beschrijving van het verschijnsel te komen alsvorens met allerlei meer of minder voor de handliggende grootheden te gaan jongleren.

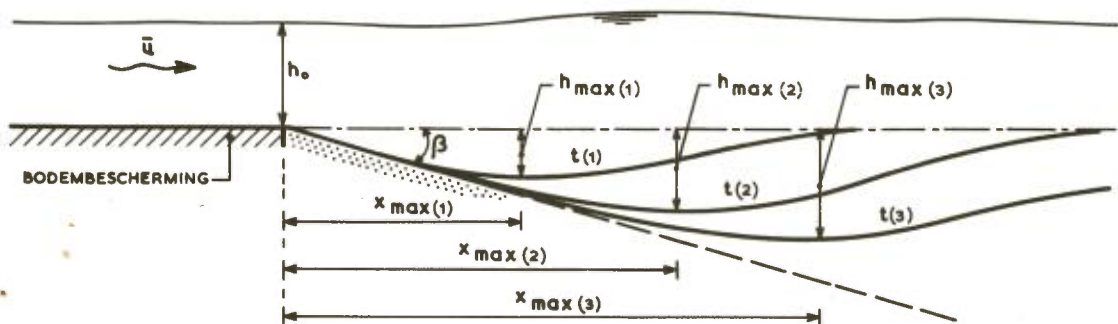
Een van de opvallende kenmerken van de beschouwde transportverschijnselen (en tegelijk een van de belangrijkste complicaties bij de analyse) is de innige samenwerking tussen stroombeeld en bedvorm. Zodra het stromende water het bodemmateriaal in beweging brengt, verandert de bodemconfiguratie. Deze verandering beïnvloedt op zijn beurt de stromingstoestand langs de bodem, die bepalend is voor het transport. Tengevolge van de verandering in de stromingstoestand verandert dus de beweging van het bodemmateriaal, wat weer een wijziging van het bed met zich meebrengt. Deze beïnvloeding over en weer tussen stroom en bodem heeft een permanent karakter, is echter niet willekeurig. De waarnemingen voeren tot de konstatering dat onder gelijkblijvende uitwendige omstandigheden het proces naar een toestand van evenwicht streeft, waarin een zeer bepaald bodempatroon met een daarbij aansluitend stroombeeld duurzaam samengaat. Elke verandering in de omstandigheden betekent echter een verstoring van dat evenwicht, waarop feilloos wordt gereageerd. Deze reactie manifesteert zich in een aan-

passing van bedvorm en stroombeeld en het streven naar een nieuwe evenwichtstoestand.

Onder de uitwendige omstandigheden kan men in dit verband verstaan de stroomcondities (waterdiepte, snelheidsverdeling, turbulentie-structuur) en de eigenschappen van het bodemmateriaal (dichtheid, gradering, korrelvorm). Deze grootheden kunnen met de tijd veranderen (getijbeweging, rivierregiem, verwerking van de bodem), maar ook van plaats tot plaats, bijvoorbeeld doordat in de geometrie van het stroombed plaatselijke verschillen bestaan. Hoe abrupter de overgangen zijn, des te gekoncentreerder is het effect op het samenspel van stroom en bodem. Bij duidelijke diskontinuiteiten kan men dan ook plaatselijk sterke verstoringen verwachten. Als voorbeelden van zulke diskontinuiteiten kan men denken aan starre voorwerpen in een stroom (brugpijler in rivier, poten van boorplatform in zee) en aan regelwerken (stuwen, schuiven). Inderdaad blijken bij dergelijke konstrukties onregelmatigheden in de bodem op te treden in de vorm van plaatselijke ontgrondingen en aanzandingen.

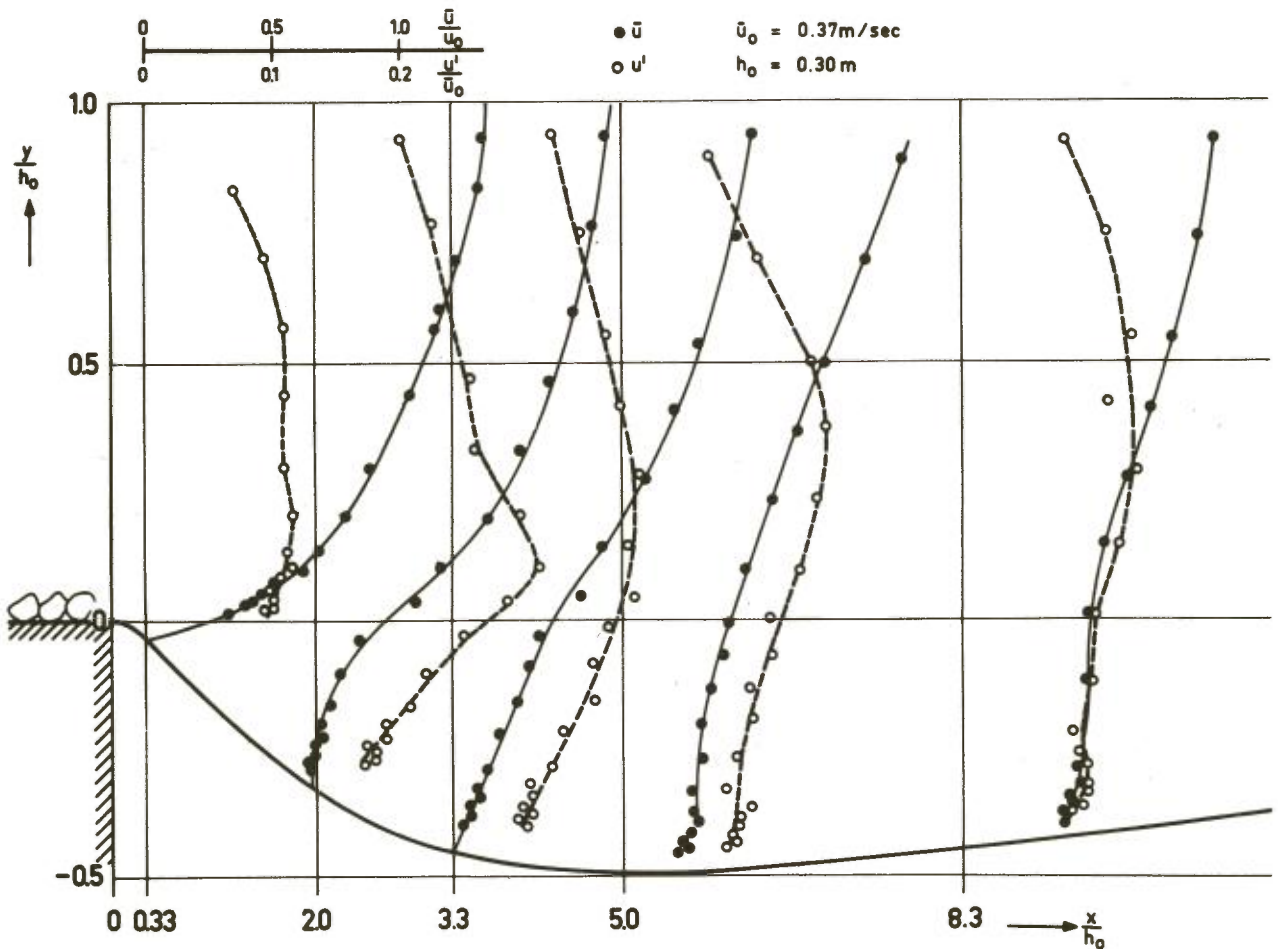
Ook bij het in dit verslag behandelde ontgrondingsonderzoek gaat het om de gevolgen van een diskontinuiteit in de geometrie van het stroombed: de lokale verstoring van stroombeeld en bedvorm wordt hier veroorzaakt door de overgang van een beschermde naar een onbeschermde zandbodem. De beschermde bodem is als vast te beschouwen; transport van bodemmateriaal vindt hier niet plaats. Benedenstrooms van de bodembescherming is de bodem beweeglijk en materiaaltransport mogelijk. Ter plaatse van de overgang zijn de stroomcondities niet in evenwicht met de bedcondities. Uit de waarnemingen valt af te lezen, dat als reactie hierop een ontgrondingskuil ontstaat.

De aanzet van deze ontgrondingskuil ligt onmiddellijk benedenstrooms van de bodembescherming. In de loop van de tijd treedt verdere uitschuring op en wordt de kuil langer en dieper; aansluitend aan de bodembescherming stelt zich een bepaalde aanzethelling in. Figuur 2 geeft dit proces schematisch weer.



Figuur 2 Schematisch beeld van het ontgrondingsproces

De aanwezigheid van de ontgrondingskuil verstoort de over de bodembescherming aankomende gelijkmatige parallelstroom. Door de profielverwijding treedt stroomvertraging op. Hiermee gepaard gaat een versterking van de turbulentie-intensiteit, zoals in het algemeen in zones met een vertragende turbulente stroom als gevolg van het ontstaan van lagen met grote snelheidsgradiënten het geval is. Een indruk van het stroombeeld in de ontgrondingskuil is te verkrijgen uit figuur 3, die een voorbeeld laat zien van de verticale verdeling van de gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit op diverse afstanden benedenstrooms van de bodembescherming.



Figuur 3 Vertikale snelheids- en turbulentieverdeling in een ontgrondingskuil

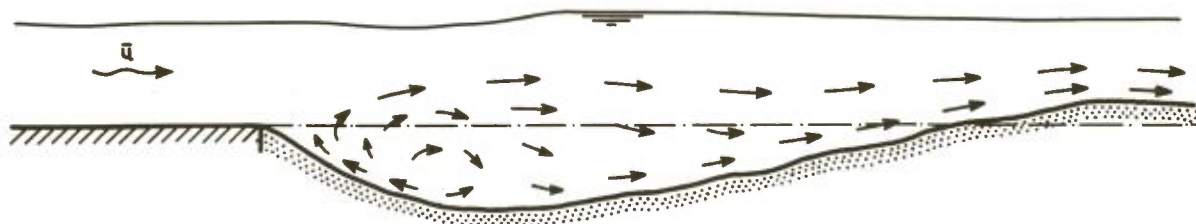
De relatief sterk turbulente stroom grijpt aan op het loskorrelige bodemmateriaal. Bij observatie van dit proces is te zien hoe het materiaal niet gelijkmatig maar stootsgewijs in kleinere en grotere wolken door het water wordt meegevoerd. Hieruit valt op te maken, dat in het bijzonder de wervels met relatief grote afmetingen en lage frekwenties ertoe bijdragen het bodemmateriaal in beweging te brengen. Voor het ont-



grondingsproces is dus de makro-turbulente structuur van de stroom van grote betekenis.

Het opgewervelde bodemmateriaal wordt meegenomen door de stroom. Deels gaat het suspensie, deels wordt het langs de bodem getransporteerd en na kortere of langere tijd weer afgezet. Bij een bepaalde mate van uitschuring laat de stroom de bodem voorbij het beschermde gedeelte los en vormt zich in het bovenstroomse deel van de ontgrondingskuil een bodemneer. De hiermee gepaard gaande retourstroom langs de bodem voert een deel van het bezonken materiaal weer terug in de richting van de bodemverdediging, totdat het niet verder tegen de helling van de kuil omhoog gebracht kan worden en blijft liggen of door de sterke wervels ter plaatse opnieuw in de hoofdstroom wordt gezogen. Hier treedt dus een soort materiaalkringloop op, waardoor zich na enige tijd in overeenstemming met stroomcondities en materiaaleigenschappen een dynamisch evenwicht instelt, dat bepalend is voor vorm en helling van het bovenstroomse deel van de ontgrondingskuil.

Verder stroomafwaarts vindt het bodemtransport plaats in de richting van de hoofdstroom, evenals het zwevende transport. Voorbij het diepste punt van de kuil ondergaat de stroom geleidelijk aan een versnelling, waardoor de betekenis van de turbulentie afneemt en de situatie meer gelijkens gaat vertonen met de stroomtoestand in een rivier. Hier is de kuilvorm niet altijd even regelmatig, maar treden dikwijls ribbelvormen op die zich met de stroom verplaatsen. Aan het einde van de kuil, en bij ontgrondingen in wervelstraten ook ernaast, vormt zich vaak een bank, waarin een deel van het opgenomen en getransporteerde materiaal weer wordt afgezet. Figuur 4 brengt het materiaaltransport in de kuil schematisch in beeld.

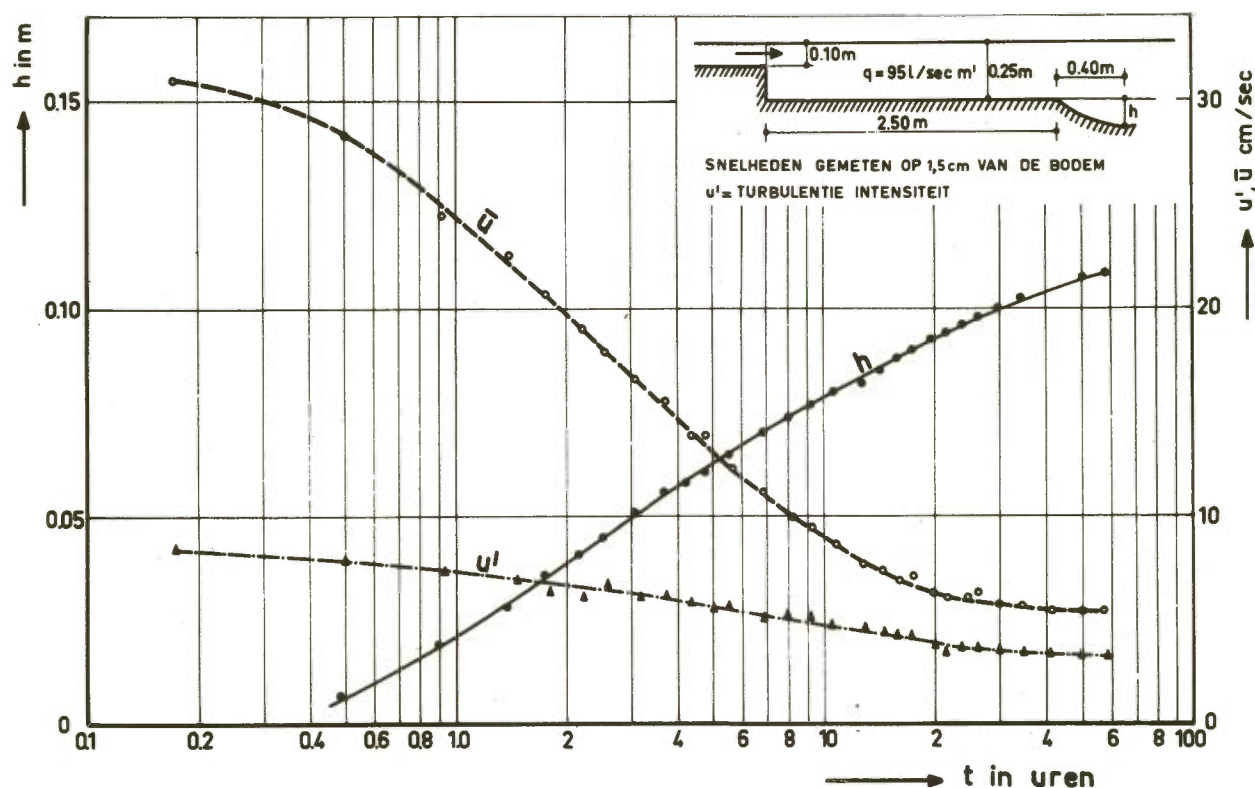


Figuur 4 Beeld van het materiaaltransport in een ontgrondingskuil

Ook in horizontale zin wordt de stroomverdeling door het ontstaan van de ontgrondingskuil beïnvloed. Dit is vooral dan het geval, wanneer de geometrie van het stroombed aanleiding geeft tot het optreden van wervelstraten, waarmee grote verschillen in ontgrondingsdiepte in dwarsrichting gepaard gaan. Door ongelijke profielverwijding en stroomvertraging treden dwars op de stroom verschillen in drukverloop op en ontstaan zo dwarsverhangen, die het stroombeeld mede gaan bepalen. Daarnaast wordt bij stroom-

richtingen scheef op de rand van de bodembescherming door de aanwezigheid van de kuil een stroomkontractie opgewekt. In het zuivere tweedimensionale geval spelen deze effecten geen rol; dit geval treedt in de praktijk echter alleen bij benadering op. In het algemeen heeft men te maken met een driedimensionaal stroom-, transport- en ontgrondingsbeeld, afhankelijk van meer of minder grillige begrenzingen die in sterkere of zwakkere mate hun invloed uitoefenen op het ontgrondingsproces.

Met het voortschrijden van het ontgrondingsproces nemen de stroomsnelheden nabij de bodem relatief sterk af, terwijl de turbulente snelheidsfluctuaties ter plaatse meer in dezelfde orde van grootte blijven. Figuur 5 laat zien hoe kuildiepte, bodemsnelheid en -turbulentie zich met de tijd ontwikkelen, wanneer men deze grootheden volgt op een bepaalde plaats in de ontgrondingskuil.

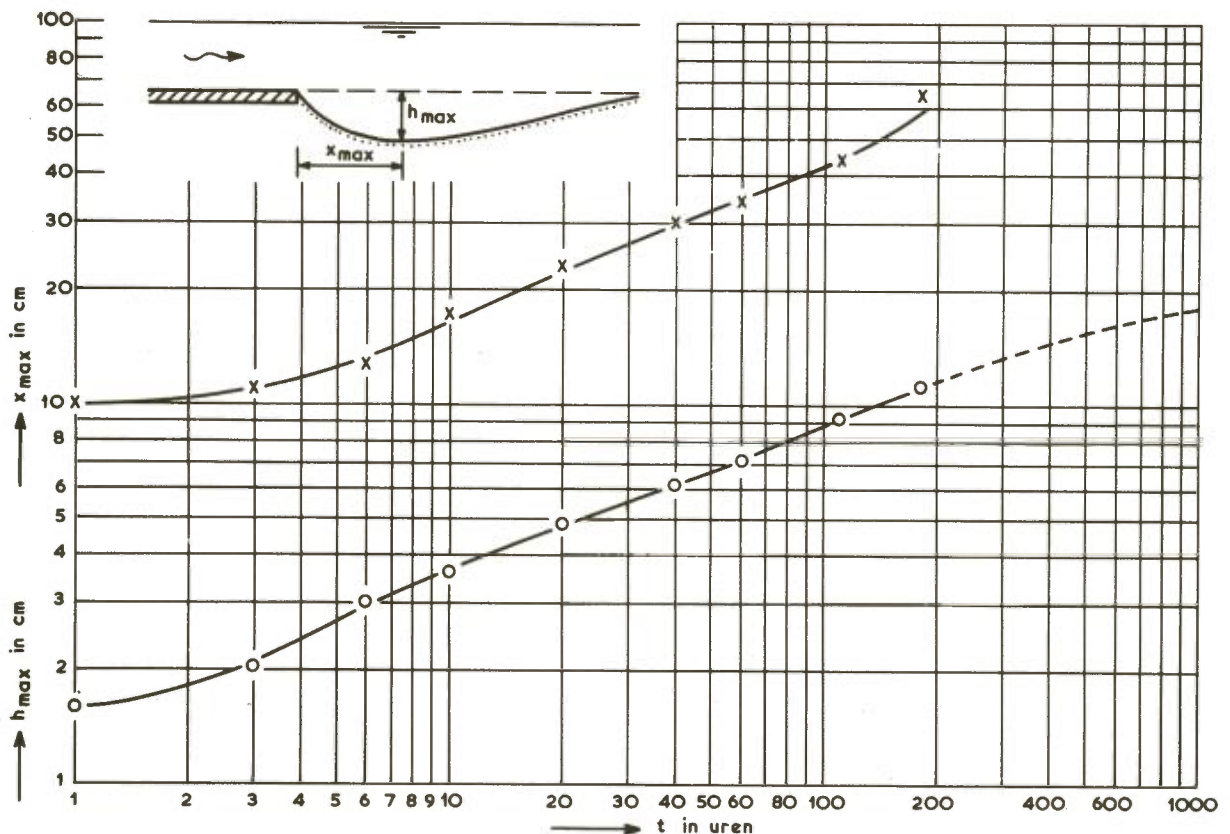


Figuur 5 Ontwikkeling van kuildiepte, bodemsnelheid en -turbulentie op een bepaalde plaats

Houdt men niet de veranderingen op een bepaalde plaats in het oog, maar let men op het gedrag van het diepste punt van de ontgrondingskuil dan verkrijgt men een beeld als weergegeven in figuur 6. Het blijkt dat in vele gevallen de verhouding

tussen  $x_{\max}$  en  $h_{\max}$  tijdens het ontgrondingsproces bij benadering konstant blijft; zolang dit het geval is, is de baan die het diepste punt van de kuil beschrijft bij benadering een rechte lijn, die gaat door het eindpunt van de vaste bodemverdediging en van daaruit afdaalt onder een helling van  $h_{\max} : x_{\max}$ .

Lang niet altijd is het echter goed doenlijk de plaats van het diepste punt duidelijk vast te stellen. Vooral bij de lange, vlakke ontgrondingskuilen die men vaak bij een meer tweedimensionaal stroombeeld kan waarnemen, is de bepaling van  $x_{\max}$  nog wel eens problematisch. Bij de meer geprononceerde, korte en puntige kuilen, die karakteristiek zijn voor het ontgrondingsbeeld in een wervelstraat, speelt dit probleem minder. Toch is, gezien het bovenstaande, de verhouding  $x_{\max} : h_{\max}$  in het algemeen minder geschikt om de vorm van de ontgrondingskuil (in feite alleen het bovenstroomse deel ervan) te karakteriseren, en verdient het de voorkeur hiervoor de aanzethelling ( $\cotg \beta$ ) te gebruiken. Dit is ook uit het oogpunt van toepassing te prefereren, daar bij de beoordeling van de grondmechanische konsekwenties van een ontgroning een schematisering van het kuilprofiel met behulp van  $\cotg \beta$  veiliger is dan die met  $x_{\max} : h_{\max}$  (vergelijk de figuren 1 en 2).



Figuur 6 Gedrag van het diepste punt van de kuil tijdens het ontgrondingsproces



Uit figuur 6 is af te lezen, dat lengte en diepte van de ontgrondingskuil niet evenredig met de tijd toenemen, maar deze toename in de loop van de tijd steeds zwakker wordt. Na de eerste aanzet verloopt het ontgrondingsproces aanvankelijk dus snel, maar naarmate de kuil groter wordt neemt het tempo van uitschuring af, totdat uiteindelijk een situatie wordt bereikt waarin stroom en bed met elkaar in evenwicht zijn gekomen en niet meer veranderen. Het hele proces blijkt in een aantal karakteristieke fasen te onderscheiden te zijn, die men aldus zou kunnen omschrijven: de aanzetfase, de ontwikkelingsfase en de stabiliseringsfase, met als eindpunt de evenwichtstoestand. (Zie ook literatuur [9 en 10] )

De aanzetfase duurt gewoonlijk slechts kort en is sterk afhankelijk van de beginkondities waaronder het ontgrondingsproces op gang komt. Men kan deze fase als afgesloten beschouwen, wanneer de bodemneer in het bovenstroomse deel van de kuil is ontstaan en het in figuur 4 geschetste transportsysteem zich heeft ingesteld. De ontwikkelingsfase valt samen met de eigenlijke uitschuring. In deze fase wordt de ontgrondingskuil voor het grootste deel gerealiseerd en verkrijgt de bovenstroomse helling van de kuil onder de dynamische invloed van retourstroom en wervelactiviteit zijn evenwichtstalud. De overgang van ontwikkelingsfase naar stabiliseringsfase is niet scherp te markeren. In laatstgenoemde komt de ontgroning geleidelijk aan tot stilstand; de stroom is dan niet meer in staat materiaal uit de ontgrondingskuil op te nemen en te transporteren. Met het bereiken van deze uiteindelijke evenwichtstoestand kan nog een aanzienlijk tijdsverloop gemoeid zijn.

Wat in het hier beschreven onderzoek is bestudeerd, heeft hoofdzakelijk betrekking op de ontwikkelingsfase van het ontgrondingsproces. De afgeleide tijdontgrondingsrelaties gelden niet meer voor de stabiliseringsfase en geven geen uitsluitel over de uiteindelijke evenwichtstoestand; sommige ervan suggereren zelfs een eindeloos voortduren van de uitschuring. Te vergaande doorvoering moet dus tot afwijkingen van de werkelijk optredende verschijnselen leiden. In het bijzonder bij fijne bodemmateri- alen in het prototype is genoemde evenwichtstoestand echter van weinig praktisch belang, gezien de enorme omvang van de ermee gepaard gaande ontgroningen en de zeer lange tijdsduur die met het bereiken daarvan gemoeid is, waardoor het tot stilstand komen van de uitschuring voornamelijk wordt bepaald door het reducerende effect tengevolge van de materiaalaanvoer van bovenstrooms.

Is men toch in de eindfase van het ontgrondingsproces op zich geïnteresseerd, dan zou men voor de evenwichtsdiepte van de kuil een afzonderlijke uitdrukking moeten afleiden. In een analoog onderzoek als M 648, in feite een bevestiging daarvan (zie literatuur [10] ), is getracht voor het tweedimensionale geval de gehele kuilontwikke-

ling in één sluitende beschrijving samen te vatten. Of deze beschrijving ook toe te passen is op driedimensionale ontgrondingen, is nog een open vraag; de beantwoording ervan valt buiten het kader van het onderhavige onderzoek en is, voor zover bekend, ook elders nog niet aan de orde gesteld.

## 2.2. Gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen

Wil men het hierboven kwalitatief beschreven ontgrondingsproces voor een gegeven concrete situatie uitdrukken in maat en getal, dan is het nodig te weten hoe het verband tussen de karakteristieke grootheden van de ontgrondingskuil en de tijd wordt bepaald door de stroomcondities en de eigenschappen van het bodemmateriaal.

Hoewel het hier duidelijk een vraagstuk van sedimenttransport betreft en het dus voor de hand ligt in de uitgebreide empirische kennis hieromtrent een aanknopingspunt te zoeken, is het niet te verwachten dat een van de vele bestaande transportformules voor dit speciale geval zonder meer bruikbaar zal zijn. Het stroombeeld in de zich ontwikkelende ontgrondingskuil wijkt daarvoor te zeer af van de eenparige parallelstroom, waarvoor bedoelde formules zijn afgeleid. Als gevolg hiervan is bijvoorbeeld de relatie tussen transport en bodemschuifspanning, zo men deze laatste grootheid voor de stroomtoestand in een ontgrondingskuil al kan definiëren, zeker niet gelijk. Men zou dus, voortdenkend in deze richting, eerst moeten nagaan welke relatie in het hier beschouwde geval geldt of welke andere fysische grootheden het materiaaltransport in de ontgrondingskuil bepalen. Vervolgens zou men in een gegeven situatie de getalwaarde van deze bepalende grootheden uit het stroombeeld moeten afleiden. Gezien de gekompliceerdheid van het stroombeeld en het nog gebrekkige inzicht in het mechanisme van het materiaaltransport, biedt een dergelijke meer theoretische benadering van het ontgrondingsproces vooralsnog weinig perspectief.

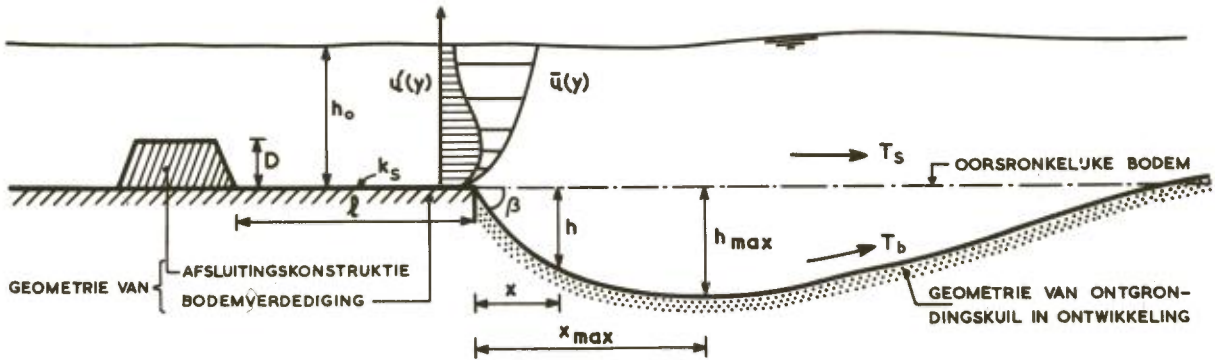
Een andere mogelijkheid is, dat men stroom en sediment zelf dit proces laat voltrekken en tracht experimenteel het verband tussen de van invloed zijnde parameters te bepalen. Hiervoor is onderzoek nodig in modellen met beweeglijke bodem, waarin het ontgrondingsproces op schaal wordt nagebootst. Voorwaarde voor de toepasbaarheid van deze methode is de mogelijkheid om de schaalfactoren, die men voor de interpretatie van de modelresultaten nodig heeft, eenduidig te bepalen.

De schaalfactoren die bij het ontgrondingsverschijnsel voor beschouwing in aanmerking komen, hebben betrekking op:

de geometrie	}	het transport
de stroom		
het bodemmateriaal		
de tijd		



De kenmerkende grootheden zijn samengevat in figuur 7.



<u>initiële stroomcondities</u>	<u>materiaaleigenschappen</u>	<u>materiaaltransport</u>
dichtheid van het water	$\rho_w$	relatieve dichtheid
viscositeit van het water	$\nu$	kenmerkende korreldiameter
gemiddelde snelheid	$\bar{u}(y)$	kritieke snelheid
kenmerk voor de turbulentie	$u'(y)$	valsnelheid
kenmerk voor de verdeling	$u_*$	
	$u' = \sqrt{(u - \bar{u})^2}$	
	<u>Lokale stroomcondities</u>	
	$\bar{u}, u', u_*$	
		$\Delta$ } bij $u_* > u_{*kr}$ ; $d$ } $u_{*kr}$ } $u'/w$ groot: $w$ } in suspensie } $u'/w$ klein: } langs de bodem

Figuur 7 Bij het ontgrondingsproces in aanmerking te nemen grootheden

Voor zover deze grootheden betrekking hebben op de geometrie van bodembescherming en bovenstrooms stroombed, de initiële stroomcondities en het bodemmateriaal is er geen probleem. Zij zijn in een concrete situatie gegeven en konstant en kunnen eenduidig op schaal worden weergegeven, zolang schaafeffekten in het stromingsverschijnsel op zich verwaarloosbaar zijn. Onzekerder is de situatie in de ontgrondingskuil, waar zich het eigenlijke te onderzoeken verschijnsel afspeelt: komt wat zich hier aan materiaaltransport in het model manifesteert in een bepaalde verhouding overeen met de gebeurtenissen in het prototype? Kriterium daarvoor is, of de resultaten in model en prototype na verloop van tijd met elkaar vergelijkbaar zijn. Niet alleen echter het eindresultaat is van belang, maar evenzeer het verloop van het proces. In tegenstelling tot die transportverschijnselen waarbij een evenwichtstoestand wordt bestudeerd, is daarom voor het ontgrondingsproces de bepaling van de tijdschaal essentieel.

Voor een eenduidige bepaling van de tijdschaal  $n_t$  is het nodig, dat deze on-

afhankelijk is van plaats en tijd, dus voor alle punten van de ontgroning en op alle tijdstippen gelijk is. Dat betekent, dat voor elk willekeurig punt van de ontgrondingskuil de ontwikkeling van de ontgrondingsdiepte met de tijd in model en prototype een overeenkomstig verloop moet hebben, of, wat op hetzelfde neerkomt, voor elk willekeurig tijdstip van het ontgrondingsproces de ontgrondingskuilen in model en prototype een overeenkomstige vorm moeten bezitten. Indien dit niet het geval is, is definitie van een tijdschaal niet mogelijk en daarmee interpretatie van een schaalproef uitgesloten. Basisvoorwaarde voor het kunnen bestuderen van ontgroningen op schaal is dus: de gelijkvormigheid van de ontgrondingskuilen in model en prototype op overeenkomstige tijdstippen in het ontgrondingsproces. In het tweedimensionale geval moet dan gelden:

$$\frac{h(x, t)}{h_0} = f\left(\frac{x}{h_0}, \frac{t}{t_1}\right) \quad (2.1.)$$

waarin  $h(x, t)$  = ontgrondingsdiepte  
 $x$  = plaatscoördinaat  
 $t$  = tijdkoördinaat  
 $h_0$  = referentie-lengte  
 $t_1$  = referentie-tijd,

en waarin de functie  $f$  voor model en prototype dezelfde moet zijn.

De mogelijkheid om het ontgrondingsproces in een model met beweeglijke bodem weer te geven en te interpreteren staat of valt met het antwoord op de vraag, of aan deze basisvoorwaarde kan worden voldaan. Dit antwoord moet dus in de allereerste plaats worden verkregen. Luidt het bevestigend, dan kan de tijdschaal van het ontgrondingsproces worden gedefinieerd als de verhouding tussen de getalwaarden van  $t_1$  in prototype en model, zoals de lengteschaal van de ontgrondingskuil volgt uit de verhouding tussen de  $h_0$ -waarden in prototype en model.

Zoals blijkt uit het feit, dat in relatie (2.1.) zowel de lengte ( $x$ ) als de diepte ( $h$ ) van de ontgrondingskuil op eenzelfde referentielengte ( $h_0$  = waterdiepte ter plaatse van het einde van de bodembescherming) zijn betrokken, is aangenomen dat de horizontale en verticale lengteschaal van het model aan elkaar gelijk zullen zijn, met andere woorden dat het model niet is samengetrokken. Dit ligt wegens de eis van gelijkvormigheid tussen model en prototype ook wel voor de hand. Het is echter ook denkbaar, dat de ontgrondingskuil in het model een zodanige vorm blijkt te krijgen, dat deze als een samentrekking van de prototype-kuilvorm is op te vatten. In dat geval is

overeenkomst tussen de kuilprofielen in model en prototype te bereiken door lengte- en diepteschaal ongelijk te kiezen. Welke situatie zich zal voordoen is nog onzeker. Het is namelijk niet bij voorbaat uit te maken, hoe het samenspel tussen stroom en bodem-materiaal in de bodemneer achter de verdediging, bepalend voor aanzehelling en kuilvorm tot aan het diepste punt, het beste op schaal is weer te geven. Om geen wellicht onnodige komplikaties te introduceren is bij het onderzoek in eerste instantie uitgegaan van een niet-samengetrokken model; uit de resultaten moet dan blijken of dit uitgangspunt kan worden gehandhaafd.

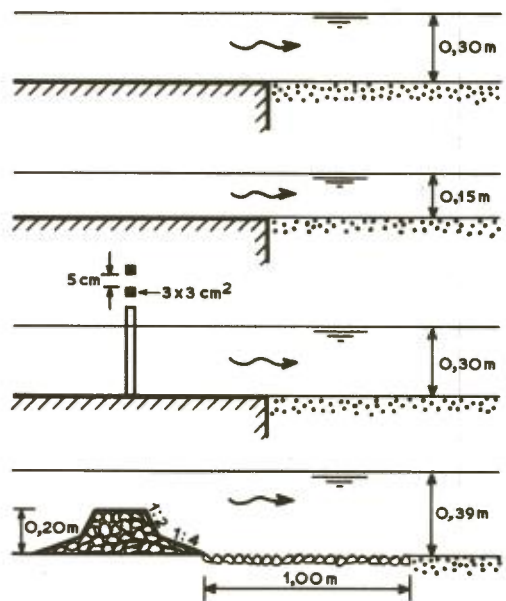
Omdat er vrijwel geen gegevens over ontgroningen in het prototype voorhanden zijn die als vergelijkingsmateriaal zouden kunnen dienen, moet de geldigheid van relatie (2.1.) worden getoetst aan de hand van modelproeven onder uiteenlopende kondities. Hiertoe is een onderzoekprogramma opgezet, bestaande uit een viertal proeven-series waarbij waterdiepte, stroomsnelheid, bodemmateriaal en geometrie systematisch zijn gevarieerd. Drie van deze proevenseries zijn uitgevoerd in de zogenaamde kleine glazen goot ( $b = 0,50$  m), de vierde in de goot van het model M 731 (geleidelijke sluiting,  $b = 1,47$  m). De volgende toestanden zijn onderzocht (zie figuur 8):

serie 1: ontgroning achter een vlakke plaat  
 $b = 0,50$  m,  $h_o = 0,30$  m

serie 2: ontgroning achter een vlakke plaat  
 $b = 0,50$  m,  $h_o = 0,15$  m

serie 3: ontgroning achter een rooster  
 $b = 0,50$  m,  $h_o = 0,30$  m

serie 4: ontgroning achter een dam  
 $b = 1,47$  m,  $h_o = 0,39$  m  
horizontale verdediging 1,00 m



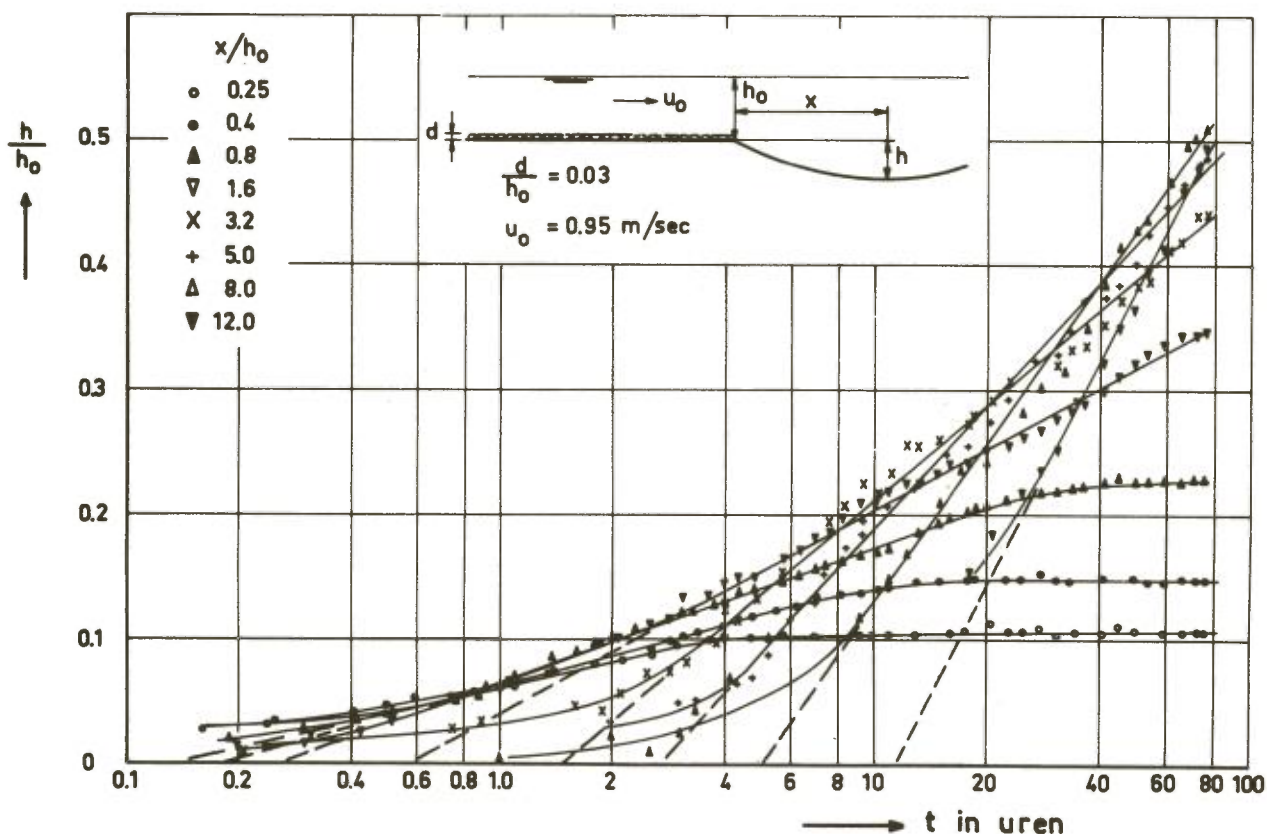
Figuur 8 Situaties waarbij de gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen is onderzocht



Als bodemmaterialeen zijn gebruikt:

zand	$d = 350 \mu\text{m}$	$\Delta = 1,65$	$w = 5,0 \text{ cm/s}$
bakeliet	$d = 630 \mu\text{m}$	$\Delta = 0,36$	$w = 2,7 \text{ cm/s}$
polystyreen	$d = 1600 \mu\text{m}$	$\Delta = 0,045$	$w = 1,5 \text{ cm/s}$

Bij elk van de proeven werd een konstant debiet ingesteld; de uitgangstoestand van de beweeglijke bodem bestond steeds uit een vlak, horizontaal bed. Tijdens het ontgrondingsproces werd op een groot aantal tijdstippen de bodemligging gepeild en telkens in een aantal vaste raaien de bereikte ontgrondingsdiepte bepaald. Een voorbeeld van de resultaten van een dergelijke proef is afgebeeld in figuur 9 (zie ook de bijlagen I-1 en I-2).



Figuur 9 Verloop van de ontgrondingsdiepte als functie van tijd en plaats

Uit de meetresultaten is afgeleid, dat het verloop van de ontgrondingsdiepte  $h$  met de tijd  $t$  in een punt op een afstand  $x$  vanaf het einde van de bodembescherming kan worden beschreven met de vergelijking:

$$\frac{h_x(t)}{h_0} = A(x) \left[ \ln t - \ln t_0(x) \right] = A(x) \ln \frac{t}{t_0(x)} \quad (2.2.)$$

Hierin is  $h_0$  de oorspronkelijke waterdiepte,  $A$  een evenredigheidsfactor en  $t_0$  de tijd die aangegeven wordt door het snijpunt van de naar beneden toe verlengde  $\ln$ -lijn met de  $h/h_0 = 0$  as (vergelijk figuur 9). De beschrijving van het ontgrondingsverloop is goed, behoudens een aanzet in het begin en het afbuigen naar een evenwicht, dat later plaatsvindt naarmate  $x$  groter is.

Voor de eenduidige bepaling van de tijdschaal, gedefiniëerd als de verhouding van de tijden nodig om dezelfde  $h/h_0$  te bereiken, is het nu noodzakelijk dat  $A$  en  $t_0$  eenwaardige functies zijn van de dimensieloze vorm geschreven afstand  $x/h_0$ .

Uit proevenserie 1 (zie figuur 8) werd voor het verband tussen  $A$  en  $x/h_0$  gevonden:

$$A = 0,075 \left( \frac{x}{h_0} \right)^{0,85} \quad (2.3.)$$

dat onafhankelijk van het ingestelde debiet en het gebruikte bodemmateriaal blijkt te gelden, zoals in bijlage I-3 aan de hand van het verkregen waarnemingsmateriaal is geïllustreerd. Deze zelfde relatie bleek ook te voldoen voor de andere drie series (zie de bijlagen I-4 t/m 6) en is dus onafhankelijk van schaal en geometrie bruikbaar.

Ook de grootheid  $t_0$  bleek onder alle onderzochte condities exponentieel met  $x/h_0$  toe te nemen. Voor de series 1, 3 en 4 sloot een waarde van 2,4 van de exponent het beste bij de waarnemingen aan (zie de bijlagen I-7, 9 en 10), terwijl voor serie 2 een exponent van 2,7 het beste voldeed (zie bijlage I-8). Alle proeven tezamen beschouwend kan men voor het verband tussen  $t_0$  en  $x/h_0$  schrijven:

$$t_0 = t_0 \left( \frac{x}{h_0} = 1 \right) \cdot \left( \frac{x}{h_0} \right)^{2,5} = \tau \cdot \left( \frac{x}{h_0} \right)^{2,5} \quad (2.4.)$$

waarin  $\tau$  een evenredigheidsfactor voorstelt, die per definitie gelijk is aan de waarde van  $t_0$  voor  $x = h_0$  en waarin de invloeden van stroom, materiaal, geometrie en schaal op het tempo van het ontgrondingsproces zijn verdiskonteerd.

De resultaten van dit vooronderzoek kunnen worden samengevat door de betrekkingen (2.3.) en (2.4.) in betrekking (2.2.) te substitueren:

$$\frac{h_x(t)}{h_o} = 0,075 \left(\frac{x}{h_o}\right)^{0,85} \cdot \ln \frac{t}{\tau \cdot \left(\frac{x}{h_o}\right)^{2,5}} \quad (2.5.)$$

en het resultaat te vergelijken met de in betrekking (2.1.) geformuleerde basisvoorwaarde voor de reproductie op schaal van het ontgrondingsproces. De konklusie is, dat betrekking (2.5.) met betrekking (2.1.) in overeenstemming is en dus inderdaad aan de basisvoorwaarde kan worden voldaan binnen het gebied waarvoor de afgeleide relaties geldigheid bezitten. Deze beperking slaat met name op relatie (2.2.), die niet opgaat voor het begin en het einde van het ontgrondingsproces, maar wel geldt voor wat eerder met de ontwikkelingsfase daarvan is aangeduid. In die fase blijkt tussen tweedimensionale ontgrondingen op verschillende schalen gelijkvormigheid te bestaan, waarbij de kuilvorm bovendien onafhankelijk blijkt van debiet en bodemmateriaal en de tot nu toe onderzochte geometrieën.

Uit het feit, dat de ontgrondingskuilen gelijkvormig zijn voor verschillende waarden van de waterdiepte volgt, dat de reproductie van een ontgrondingsverschijnsel in de natuur in een geometrisch gelijkvormig, dus niet-samengetrokken model moet plaatsvinden. Dat de gelijkvormigheid van de kuilen ook bij variaties in stroomsnelheid en bodemmateriaal gehandhaafd blijft, betekent, dat - onder de tot nu toe onderzochte omstandigheden - voor de reproductie van de kuilvorm geen nadere voorwaarden aan de modelschalen gesteld behoeven te worden. Dit laatste wijst erop, dat de invloed van de viskositeit op het ontgrondingsproces van ondergeschikt belang is. Dit is in overeenstemming met de konstatering, dat het in beweging raken van het bodemmateriaal in hoofdzaak is toe te schrijven aan de wervelactiviteit, waarbij zoals gesignaleerd de relatief grote wervels het meest werkzaam blijken te zijn. Daar deze grote wervels nauwelijks door de viskositeit worden beïnvloed maar vrijwel geheel door de geometrie worden bepaald, is het begrijpelijk dat geometrische gelijkvormigheid tussen model en prototype voor het weergeven van het ontgrondingsproces op schaal een noodzakelijke maar, binnen het geldigheidsgebied van relatie (2.2.), ook voldoende voorwaarde is.

Het blijkt dus mogelijk op eenduidige wijze een tijdschaal voor het ontgrondingsproces te definiëren, zodat in principe de mogelijkheid is aangetoond tweedimensionale ontgrondingen door middel van modelonderzoek te bestuderen. Wenst men die konklusie uit te breiden tot driedimensionale ontgrondingen, dan zou men geneigd zijn om, analoog aan de hierboven gegeven beschouwing, behalve voor de lengterichting ook voor de breedterichting van de ontgrondingskuil de gelijkvormigheidseis te stellen,



zodat voor alle punten in het dwarsprofiel een invariante tijdschaal geldt. Wegens de nog te bespreken samenhang tussen tijdschaal en stromingscondities is dit alleen realiseerbaar onder bepaalde voorwaarden. Het blijkt echter wel steeds mogelijk om bij een driedimensionaal ontgrondingsbeeld, dat men uit een modelonderzoek verkregen heeft, voor elke langsdoorsnede afzonderlijk een tijdschaal te definiëren, die dan weliswaar in dwarsrichting van punt tot punt verschilt, maar per langsgaai eenduidig is. Dit betekent dus in feite, dat men het driedimensionale ontgrondingsbeeld in smalle stroken verdeelt, en elke strook op zichzelf als een geval van tweedimensionale ontgroning beschouwt. De konsekwentie hiervan is, dat het niet mogelijk is een driedimensionale bodemkonfiguratie die men op een bepaald moment heeft opgemeten, direkt naar het prototype te vertalen. Dit kan alleen via een omweg gebeuren, waarbij men uit het per langsgaai afzonderlijk bepaalde ontgrondingsverloop het totaalbeeld moet rekonstrueren.

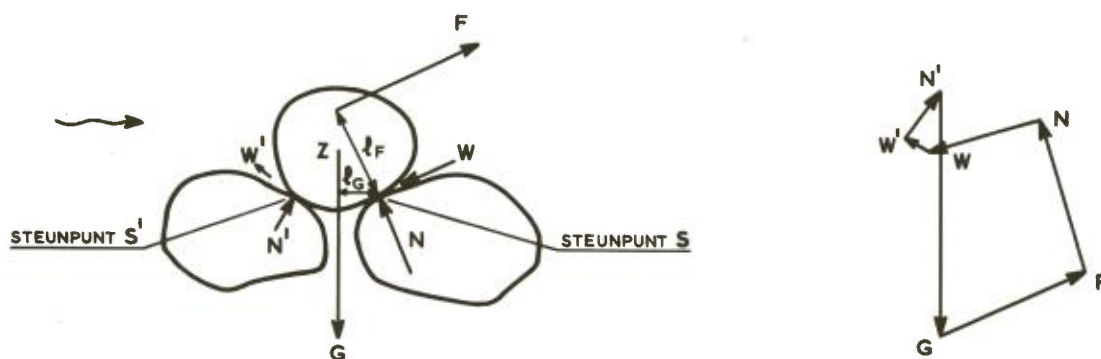
### 2.3. Begin van beweging van bodemmateriaal

Niet elke beweging van de stromende vloeistof heeft sedimenttransport tot gevolg; waarnemingen leiden tot de konklusie dat dit pas optreedt bij een zekere intensiteit van de stroom. Ontgroning benedenstrooms van een bodembescherming is dus alleen dan te verwachten, als de werkelijk aanwezige stroom-intensiteit ter plaatse een bepaalde drempelwaarde overschrijdt. Tevens is het te verwachten dat naarmate deze overschrijding groter is, de stroom krachtiger op de beweeglijke bodem zal inwerken en het ontgrondingsproces sneller zal verlopen. Het is dus aannemelijk, dat het verschil tussen de aanwezige stroom-intensiteit en de drempelwaarde daarvan, waar beneden geen materiaaltransport plaatsvindt, voor het tempo van het ontgrondingsproces en daarmee voor de tijdschaal een belangrijke parameter vormt. Dit blijkt inderdaad zo te zijn, zodat de bepaling van deze parameter, die men de transportkapaciteit van de stroom zou kunnen noemen, nadere aandacht verdient.

Om te beginnen is dan na te gaan, onder welke condities de transportkapaciteit van de stroom nul wordt en dus genoemde drempelwaarde wordt bereikt. Deze situatie vormt voor het modelonderzoek een ondergrens, die men met de keuze van de instelcondities niet te dicht mag naderen; wordt namelijk de transportkapaciteit te klein, dan kan de ontgroning zich niet meer behoorlijk ontwikkelen en gaat de geldigheid van de relaties, waarop de gelijkvormigheid van de ontgrondingskuilen is gebaseerd, verloren. Gevraagd wordt dus voor gegeven omstandigheden die grenskondities te bepalen, waarbij nog juist geen materiaaltransport optreedt, anders gezegd, die toestand waarbij het bodemmateriaal op het punt staat in beweging te komen.

Deze labiele evenwichtstoestand, die men in de wandeling met "begin van beweging" aanduidt, is afhankelijk van de stroomcondities en de eigenschappen van het bodemmateriaal. De intensiteit van de stroom wordt gekarakteriseerd door de gemiddelde snelheid  $\bar{u}$ , de turbulente snelheidsfluctuaties  $u'$  en de snelheidsverdeling, die door de algemene stromingstoestand (laminair, turbulent) en de invloed van de wanden wordt bepaald en waarvoor de viscositeit  $\nu$  en de schuifspanningssnelheid  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$  kenmerkende grootheden zijn (vergelijk figuur 7). De weerstand van het (kohesievrije) bodemmateriaal tegen de inwerking van de stroom wordt in de eerste plaats bepaald door het gewicht van de enkele korrel, dat afhangt van de karakteristieke korreldiameter  $d$  en de dichtheid  $\rho_s$ ; voorts spelen de korrelvorm en de gradering een niet te verwaarlozen, maar sekundaire rol. Uit een beschouwing van het krachtenspel tussen stroom en korrel is met behulp van genoemde grootheden een evenwichtsvoorwaarde voor het begin van beweging af te leiden. De getalwaarden van de daarin voorkomende evenredigheidsfactoren moesten voor een concreet geval experimenteel worden bepaald.

De krachten, die aangrijpen op een korrel gelegen in de bovenste laag van het bed, zijn in figuur 10 schematisch in beeld gebracht. Hierin stelt  $F$  de kracht voor, die het stromende water op de korrel uitoefent, en is  $G$  het gewicht van de korrel onder water;  $N$ ,  $N'$ ,  $W$  en  $W'$  zijn respectievelijk de normale en tangentiële steunpuntreacties, die worden geleverd door de onderliggende korrels in de vorm van druk- en wrijvingskrachten in de contactpunten  $S$  en  $S'$ .



Figuur 10 Krachtenspel tussen stroom en bed

Zolang deze krachten in evenwicht zijn is de korrel in rust. Dit evenwicht wordt echter verbroken, wanneer  $F$  zodanig toeneemt, dat het door deze kracht uitgeoefende moment om het steunpunt  $S$  groter wordt dan het tegenwerkende moment



tengevolge van het gewicht  $G$ . Omdat trekkrachten in niet-kohesief materiaal niet kunnen worden overgedragen, zal de korrel dan in  $S'$  het contact met de ondergrond verliezen en om  $S$  gaan kantelen. Beweging gaat dus optreden, indien:

$$F \cdot l_F > G \cdot l_G \quad (2.6.)$$

Voor een korrel van willekeurige vorm kan worden gesteld:

$$F = \alpha_F \cdot \tau d^2$$

$$G = \alpha_G \cdot (\rho_s - \rho) g d^3$$

waarin $\tau$ = bodemschuifspanning	[kg/ms <sup>2</sup> ]
$d$ = korreldiameter	[m]
$\rho_s$ = soortelijke massa (dichtheid) bodemmateriaal	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$ = soortelijke massa (dichtheid) vloeistof	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ = versnelling van de zwaartekracht	[m/s <sup>2</sup> ]

en  $\alpha_F$  en  $\alpha_G$  vormfactoren zijn, die respectievelijk afhangen van aangestroomde oppervlakte en inhoud van de korrel. De bodemschuifspanning  $\tau$  is in feite een verzamelgrootte voor de werking die de vloeistof op de korrel uitoefent, en die vrijwel altijd uit een combinatie van druk- en liftkrachten en viskeuze effecten bestaat.

De voorwaarde voor begin van beweging (2.6.) kan dus nader worden uitgewerkt tot:

$$\alpha_F l_F \cdot \tau d^2 > \alpha_G l_G \cdot (\rho_s - \rho) g d^3 \quad (2.7.)$$

ofwel:

$$\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d} > \frac{\alpha_G l_G}{\alpha_F l_F} = \psi_{kr} \quad (2.8.)$$

De grootte van  $l_F$  en van  $l_G$  (zie figuur 10) is afhankelijk van vorm en stapeling van de korrels en van de plaats waar de krachten op de korrel aangrijpen. Voor  $G$  is dit het zwaartepunt, terwijl de ligging van het aangrijpingspunt van  $F$  bepaald wordt door de stromingstoestand om de korrel. Deze lokale stromingstoestand kan worden gekarakteriseerd door de verhouding van de korreldiameter  $d$  en de "dikte" van

de viskeuze grenslaag  $\delta = 11,6 \nu / u_{*}$ , waaruit het dimensieloze kengetal  $Re_{*} = u_{*}d/\nu$  als kenmerkende parameter volgt.

De grootheid  $\psi_{kr}$ , waarmee volgens (2.8.) de grenswaarde voor het optreden van materiaaltransport wordt aangegeven, is dus afhankelijk van de parameter  $Re_{*}$  als uitdrukking van de stromingstoestand om de korrel, en van de "sekundaire materiaaleigenschappen", waaronder te verstaan zijn korrelvorm, stapeling en gradering:

$$\psi_{kr} = f(Re_{*}, \text{sekundaire materiaaleigenschappen}) \quad (2.9.)$$

Deze afhankelijkheid is theoretisch niet nader te specificeren; dit kan alleen met behulp van experimenten worden gedaan.

De eerste en meest bekende experimentele bepaling van relatie (2.9.) is afkomstig van Shields; na hem is door vele anderen onderzoek hiernaar verricht. Bij deze experimenten worden de stroomcondities gemeten die representatief geacht worden voor het moment waarop het bodemmateriaal begint te bewegen; vervolgens wordt hieruit de kritieke waarde van  $u_{*} = \sqrt{\tau/\rho}$  afgeleid, die in combinatie met de materiaalgrootheden van vloeistof en sediment de getalwaarden van  $\psi_{kr}$  en  $Re_{*}$  bepaalt. Essentieel bij deze proeven is, dat men het begin van de beweging volgens een duidelijk en hanteerbaar criterium definieert, en dat men in staat is een verband te leggen tussen de gemeten grootheden en  $u_{*}$ .

Een eenduidige bepaling van  $u_{*}$  uit de stromingsgrootheden is mogelijk bij eenparige stroom. Hiervoor geldt:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{u} = C \sqrt{R I} \\ \tau = \rho g R I \end{array} \right\} u_{*} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g R I} = \frac{\sqrt{g}}{C} \cdot \bar{u} \quad (2.10.)$$

met

$$C = 18 \log \frac{12 R}{k + \frac{\delta}{4}}$$

Het aangeven van een deugdelijk criterium voor de definitie van "begin van beweging" levert meer problemen. Dit is waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van het feit, dat tussen de diverse onderzoekresultaten nogal wat spreiding bestaat. Omdat duidelijkheid op dit punt voor de interpretatie van de ontgrondingsproeven zeer gewenst werd geacht, is in het kader van het systematisch onderzoek een speciale serie proeven aan de bepaling van  $\psi_{kr}$  gewijd.

De proeven zijn uitgevoerd in een glazen goot met een lengte van 16 m en een breedte van 0,50 m, dezelfde als voor de onder 2.2. beschreven proeven is gebruikt.

De lengte waarover het beweegbare bodemmateriaal was aangebracht bedroeg 10 m, de laagdikte ervan was 5 cm. De waarnemingssektie bevond zich tussen 5 m en 6 m vanaf het bovenstroomse einde van het bodemmateriaal. Het toegevoerde debiet was continu regelbaar en werd gemeten met een cirkelvormige meetstuw. Ter plaatse van de waarnemingssektie kon op elk gewenst moment de waterdiepte worden afgelezen. Vervallen werden gemeten met behulp van twee statische buizen op een onderlinge afstand van 6 m en werden afgelezen met een vervalmanometer. Tijdens elke proef werd de temperatuur van het water opgenomen. Een overzicht van de meetopstelling is gegeven in bijlage I-11.

Als bodemmateriaal zijn gebruikt 7 soorten zand, 2 soorten bakeliet en 2 soorten polystyreen. De samenstelling hiervan is weergegeven in de bijlagen I-12 t/m 22 en komt bij benadering overeen met die van de voor het ontgrondingsonderzoek gebruikte materialen. Bij elk materiaal werden de stroomcondities vastgelegd waaronder "begin van beweging" optrad. Hierbij werden voor dit "bewegen" de volgende zeven kwalitatief omschreven criteria gehanteerd:

- kriterium 1: verplaatsen van de korrels, af en toe
- kriterium 2: korrels aan de wandel, hier en daar
- kriterium 3: korrels aan de wandel, op vrij veel plaatsen
- kriterium 4: korrels aan de wandel, bijna overal
- kriterium 5: korrels aan de wandel, overal doch niet permanent
- kriterium 6: korrels aan de wandel, overal en permanent
- kriterium 7: begin opmars van de korrels.

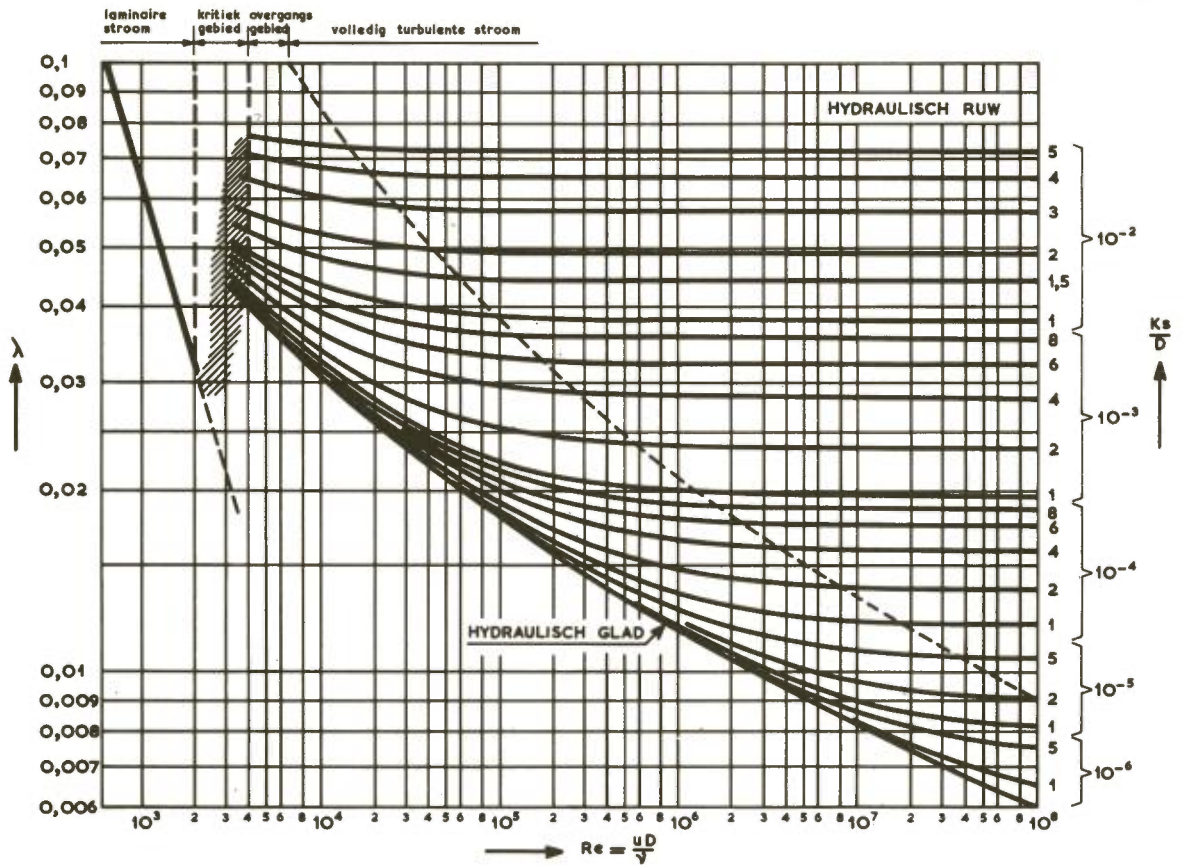
De overgang van rust naar de verschillende stadia van beweging werd bewerkstelligd door geleidelijk het debiet op te voeren. Elke materiaal werd bij tenminste twee waterdiepten onderzocht, het merendeel bij drie.

Bij de berekening van  $u_*$ , die voor elk stadium van beweging is bepaald, is in betrekking (2.10.) een verfijning aangebracht om de wandinvloed van de relatief smalle goot in rekening te brengen. Daarbij is verondersteld, dat de wandschuifspanning  $\tau_w$  en de bodemschuifspanning  $\tau_b$  zich verhouden als de weerstandskoefficienten  $\lambda_w$  en  $\lambda_b$ , die berekend kunnen worden volgens de formule van White-Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3,71 D} \right) \quad (2.11.)$$

of grafisch kunnen worden bepaald uit het hierop gebaseerde diagram van Moody (figuur 11).





Figuur 11 Diagram van Moody

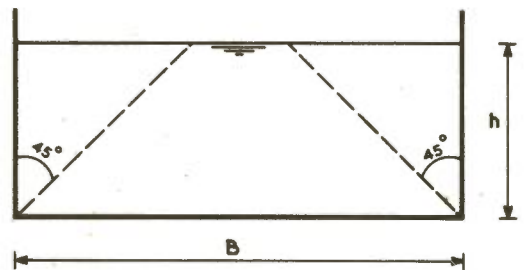
Weliswaar geldt (2.11.) strikt genomen slechts voor volledig gevulde gesloten leidingen, maar desondanks is deze formule met goede benadering op open leidingen toe te passen, wanneer men hierin  $D = 4 R$  substitueert.

Voor de bepaling van  $\lambda_w$  en  $\lambda_b$  is aangenomen, dat de glazen gootwand als hydraulisch glad is te beschouwen, voor de bodemruwheid  $k_s = d_{50}$  gesteld kan worden, en de invloedsgebieden van wanden en bodem afgebakend kunnen worden als in figuur 12 is aangegeven.

$$D_w = 4 R_w = 4 \frac{\frac{1}{2} h^2}{h} = 2 h$$

$$D_b = 4 R_b = \frac{4 (Bh - h^2)}{B}$$

$$(h \leq \frac{1}{2} B)$$



Figuur 12 Verdeling gootprofiel in invloedsgebieden voor wanden en bodem

Door nu de veronderstelling  $\tau_w : \tau_b = \lambda_w : \lambda_b$  te substitueren in de voor eenparige stroom geldende betrekking:

$$\rho g l b h = \tau_b \cdot B + \tau_w \cdot 2h$$

volgt na enige herleiding als gewijzigde versie van relatie (2.10.):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} = \sqrt{g l \frac{Bh}{B + 2h \frac{\lambda_w}{\lambda_b}}} \quad (2.12.)$$

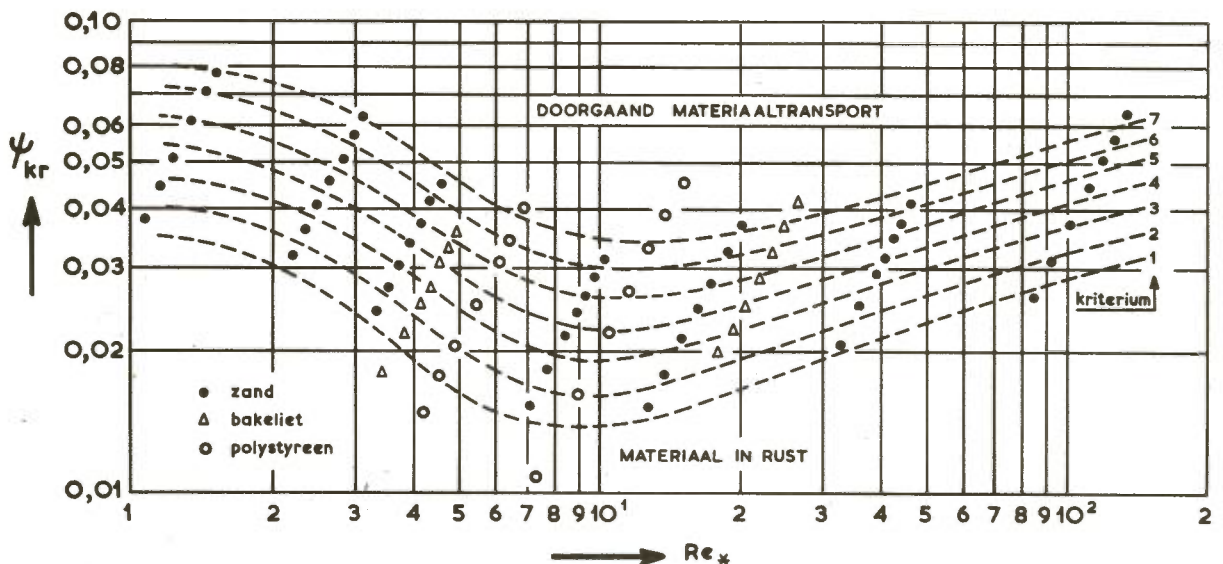
Met relatie (2.12.) zijn voor de verschillende bodemmaterialen de getalwaarden van  $u_*$  uit de gemeten stroomcondities, behorende bij de zeven genoemde criteria, afgeleid. De resultaten staan in de bijlagen I-12 t/m 22 vermeld. Uit de tabellen blijkt, dat geen systematische invloed van de waterdiepte op de  $u_*$ -waarden aanwezig is, zodat de optredende verschillen als meetonauwkeurigheden kunnen worden beschouwd. De grootte van  $u_{*krit}$  wordt dus uitsluitend door de situatie bij de bodem bepaald en is onafhankelijk van de waterdiepte. Deze konklusie bevestigt vroegere metingen, waarbij voor verschillende waterdiepten bij het begin van beweging gelijke snelheden  $u$  op gelijke afstanden  $y$  van de bodem gevonden werden, en dus, daar dit gelijke schuifspanningen bij de bodem impliceert, ook gelijke waarden van  $u_{*kr}$  (zie bijlage I-23). Wenst men het begin van beweging door een gemiddelde snelheid te karakteriseren dan is deze bijgevolg wel van de waterdiepte afhankelijk, wat ook direkt volgt uit betrekking (2.10.), die met het oog hierop kan worden omgewerkt tot:

$$\bar{u}_{kr} = \frac{C}{\sqrt{g}} \cdot u_{*kr} \approx \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot u_{*kr} \quad (2.13.)$$

Een samenvatting van de resultaten is gegeven in onderstaande tabel, waarin voor elk materiaal de  $u_*$ -waarden, gevonden bij de verschillende waterdiepten, per criterium zijn gemiddeld.

materiaal	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$w_{50}$ (cm/s)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$u_*$ (cm/s) volgens criterium						
					1	2	3	4	5	6	7
polystyreen	1050	1600	1,8	$1,30 \cdot 10^{-6}$	0,34	0,37	0,40	0,44	0,49	0,52	0,56
polystyreen	1046	2400	3,3	1,12	0,34	0,42	0,49	0,54	0,60	0,65	0,71
bakeliet	1350	610	2,4	1,08	0,61	0,68	0,73	0,76	0,80	0,84	0,87
bakeliet	1350	1800	6,0	1,10	1,11	1,18	1,25	1,34	1,43	1,52	1,61
zand	2650	120	1,4	1,10	0,78	0,89	0,97	1,04	1,13	1,22	1,27
zand	2650	220	2,4	1,06	1,07	1,14	1,20	1,28	1,36	1,44	1,50
zand	2650	330	4,5	1,13	1,15	1,22	1,29	1,36	1,42	1,50	1,56
zand	2650	580	8,0	0,975	1,20	1,32	1,43	1,51	1,58	1,65	1,71
zand	2650	925	12,0	1,10	1,52	1,65	1,80	1,93	2,05	2,21	2,37
zand	2650	1600	16,0	1,13	2,32	2,55	2,75	2,86	3,02	3,12	3,26
zand	2650	2600	21,5	1,00	3,30	3,58	3,97	4,36	4,63	4,89	5,18

Uit de in de tabel verzamelde gegevens zijn de waarden berekend van de parameters  $\Psi = \tau / (\rho_s - \rho) g d = u_*^2 / \Delta g d$  (met  $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho =$  relatieve dichtheid van het bodemmateriaal onder water) en  $Re_* = u_* d / \nu$ , waarbij voor alle materialen  $d_{50}$  als kenmerkende korreldiameter is gebruikt. Door de korresponderende waarden van  $\Psi$  en  $Re_*$  tegen elkaar uit te zetten, verkrijgt men het beeld van figuur 13, dat in grafische vorm de gezochte relatie (2.9.) en daarmee de afhankelijkheid van het begin van beweging van stromingstoestand en materiaaleigenschappen weergeeft.



Figuur 13 Verband tussen  $\Psi_{kr}$  en  $Re_*$  bij diverse criteria



Dit beeld komt in grote lijn overeen met het door Shields en anderen gevonden verband. Duidelijker dan tot dusver komt echter uit het hier verrichte onderzoek naar voren, welke invloed de keuze van het criterium op de kritieke waarde van  $\psi$  heeft. Er blijkt een tamelijk ruime marge te bestaan tussen de toestand van volkomen rust en die van doorgaand materiaaltransport, zodat in feite niet van een kritisch punt, maar van een overgangstrajekt moet worden gesproken, waarbinnen het bodemmateriaal in verschillend sterke mate in beweging komt. Daarmee ontstaat, ondanks het subjektieve element dat in de gehanteerde criteria besloten ligt, een wat genuanceerder beeld van het verschijnsel "begin van beweging" en wordt de mogelijkheid geopend in konkrete gevallen de keuze van kritieke waarden aan te passen aan de aard van het betreffende probleem. Hiertoe zijn in figuur 13 zo goed mogelijk aansluitend bij de punten zeven krommen getrokken, die geacht kunnen worden met de zeven criteria overeen te komen.

Bij deze intepretatie van de uitkomsten is de invloed van de sekundaire materiaaleigenschappen niet in aanmerking genomen. Verschillen in korrelvorm en korrelverdeling zijn bij de gebruikte materialen ontegenzeggelijk aanwezig; vooral bakeliet wijkt door zijn sterkere gradering en meer plaatvormige korrel af van de overige materialen. Ook in figuur 13 treden tussen zand, bakeliet en polystyreen aanwijsbare verschillen op, die kennelijk niet met behulp van de grootheden  $\Delta$  en  $d_{50}$  zijn uit te drukken. Hoe deze verschillen met de sekundaire materiaaleigenschappen in verband te brengen zijn, is echter ook niet zonder meer duidelijk. Een poging, om door introductie van de valsnelheid de invloed van de korrelvorm (van bijvoorbeeld bakeliet) beter te verdiskonteren, leidde niet tot succes, zoals uit bijlage I-24 te zien is, waarin naast  $\psi$  de parameter  $u_{*c}/w$  ter karakterisering van het begin van beweging is gebruikt. Op deze problematiek is in het kader van dit onderzoek niet dieper ingegaan.

Bovenbeschreven uitkomsten gelden voor een eenparige stroom. Is van een dergelijke stroom de optredende intensiteit gegeven en drukt men deze stroom-intensiteit uit in  $\psi$ , dan heeft men in de parameter  $(\psi - \psi_{kr})$  een maat gevonden voor de transportkapaciteit van die stroom. Benedenstrooms van de bodemverdediging is de waterbeweging echter niet eenparig, en de vraag rijst dus, hoe het verkregen resultaat kan worden toegepast op de veel gekompliceerdere stroomtoestand in de ontgrondingskuil. Daarbij komt niet alleen de afleiding van  $u_{*c}$  uit de stroomkondities in het geding, maar dient ook de invloed van de verhoogde turbulentie in rekening te worden gebracht.

Als gevolg van deze relatief sterke turbulentie zal de transportkapaciteit van de stroom in de ontgrondingskuil in het algemeen groter zijn dan die van een onge-

stoorde parallelstroom. Deze vergroting kan men op twee manieren ontstaan denken, namelijk door een verkleining van  $\psi_{kr}$ , respectievelijk door een vergroting van  $\psi$ . Het maakt in feite geen verschil of men van de ene gedachte uitgaat of van de andere, daar men in beide gevallen de verandering, hetzij de reductie van  $\psi_{kr}$ , hetzij de versterking van  $\psi$ , toch niet theoretisch kan afleiden, maar experimenteel zal moeten vaststellen.

In literatuur [11] wordt uitgegaan van de eerstgenoemde mogelijkheid; hierin wordt voor elke gegeven geometrie door middel van een afzonderlijk proef de stroomkondities bepaald, waarbij nog juist geen materiaal getransporteerd wordt. Het voordeel van deze werkwijze is, dat deze op zeer verschillende situaties van plaatselijke ontgrondingen toepasbaar is; het bezwaar ervan, dat met name bij driedimensionale ontgrondingen in sluitgaten de grenskondities voor verschillende punten in het dwarsprofiel verschillend zijn en dus allemaal afzonderlijk bepaald zouden moeten worden.

Bij het hier beschreven onderzoek is de andere methode gehanteerd. Voor elk bodemmateriaal is steeds de bij eenparige stroom gevonden waarde van  $\psi_{kr}$  aangehouden, terwijl de sterkte van de stroom met een bepaalde faktor is vergroot. De getalwaarde van deze vergrotingsfaktor  $\alpha$  kan in een aantal gevallen van tweedimensionale ontgroning aan de aanstroomkondities worden gekorreleerd, maar is overigens in het algemeen rechtstreeks uit de ontgrondingsmetingen af te leiden. Bij tweedimensionale ontgrondingen is een bepaalde geometrie door één waarde van  $\alpha$  gekarakteriseerd; bij driedimensionale ontgrondingen varieert de waarde van  $\alpha$  van punt tot punt in het dwarsprofiel.

### 3. Tweedimensionaal onderzoek (M 648)

#### 3.1. Inrichting en uitvoering van de proeven

In de hierboven beschreven voorstudies is de noodzakelijke grondslag gelegd voor de uitvoering en interpretatie van het ontgrondingsonderzoek. Nu gaat het erom de bij het ontgrondingsproces waargenomen wetmatigheden zodanig te formuleren, dat de voor het specifieke modelonderzoek benodigde schaalrelaties kunnen worden opgesteld. Als variabelen treden daarbij op de lengteschaal (= diepteschaal), de snelheidschaal, de "materiaalschaal" en de tijdschaal. Daar voorts de stroomcondities bij de bodem en daarmee het ontgrondingsproces in sterke mate door de geometrische eigenschappen van bodembescherming en afsluitkonstructie worden bepaald, vormt ook deze geometrie een met name voor praktische ontwerpdoeleinden interessante variabele. Waterdiepte, stroomsnelheid, bodemmateriaal en geometrie zijn derhalve systematisch gevarieerd, teneinde de invloed van elk van deze parameters afzonderlijk op het tempo van het ontgrondingsproces te bepalen. In totaal zijn circa 250 situaties onderzocht.

Het onderzoek M 648 is voor het grootste deel uitgevoerd in twee glazen goten in het Laboratorium Delft. In de kleinste van deze twee goten ( $b = 0,5$  m,  $l = 16$  m) kon boven de bodemverdediging een waterdiepte worden gerealiseerd van maximaal 30 cm, in de grote glazen goot ( $b = 1,0$  m,  $l = 25$  m) bedroeg  $h_0$  maximaal 60 cm. Voor de ontgroning was dan in beide gevallen nog een diepte beschikbaar van circa  $0,8 h_0$ . Met deze twee goten konden schaalproeven in de verhouding 1 : 2 worden gedaan. Om de invloed van de lengteschaal over een ruimer gebied te kunnen beoordelen is bovendien een tiental proeven verricht in de grote stroomgoot van het Laboratorium De Voorst ( $b = 3,0$  m,  $l = 100$  m), waardoor overeenkomstige situaties met onderlinge lengteschalen van 1 : 3 en 1 : 6 konden worden onderzocht.

In de betreffende goot werd over de gehele breedte een bodembescherming aangebracht van een bepaalde lengte en een bepaalde ruwheid, al dan niet in combinatie met een tweedimensionale drempelvormige konstructie (zie figuur 14). Benedenstrooms hiervan bevond zich de ontgrondingsbak, gevuld met het beweegbare bodemmateriaal. Als bodemmateriaal zijn toegepast zand in diverse fijnheden ( $\rho_s = 2650$  kg/m<sup>3</sup>), grof en fijn bakeliet ( $\rho_s = 1360$  kg/m<sup>3</sup>) en polystyreenkorrels ( $\rho_s = 1050$  kg/m<sup>3</sup>). De meeste van de gebruikte materialen vertoonden slechts een zeer geringe gradering; een uitzondering hierop vormden het duinzand ( $d_{50} = 225$   $\mu$ m), het zand met korreldiameter  $d_{50} = 350$   $\mu$ m en de twee soorten bakeliet. De korrelverdelingsdiagrammen zijn gegeven in bijlage II-2.

Bij het ontgrondingsonderzoek is dus zowel de invloed van de korreldiameter als van de dichtheid van het materiaal nagegaan. Dit laatste werd mede ingegeven door het feit, dat de resultaten onder meer toegepast zouden moeten worden op situaties,



waarbij in het prototype de bodem reeds uit zulk fijn zand bestaat, dat een verkleining op schaal niet meer mogelijk is. In die gevallen is men genoodzaakt bij het modelonderzoek zijn toevlucht te nemen tot soortelijk lichtere materialen. Op grond van kosten- en bruikbaarheidsoverwegingen zijn hiervoor de kunststoffen bakeliet en polystyreen gekozen.

Het bakeliet week enigszins af van de twee andere materialen door zijn iets plattere korrelvorm; bovendien was het niet helemaal homogeen, maar bestond er een zekere spreiding in de dichtheid van de verschillende korrels. De bepaling van deze dichtheid werd nog bemoeilijkt doordat het materiaal enigszins poreus was, wat een verschil in  $\rho_s$ -waarde bij gedroogde en met water verzadigde toestand tot gevolg had. Ook was het op de lange duur aan vertering onderhevig. De polystyreenkorrels werden gekenmerkt door een cilindrische vorm en hadden een zeer glad oppervlak, dat bedekt was met een mikroskopisch dun oliefilmpje. Hierdoor werd het materiaal gemakkelijk vastgehouden door de oppervlaktetenspanning van het water en was het, vooral in verse toestand, moeilijk tot bezinken te krijgen; na veelvuldig gebruik werd dit beter. Ondanks deze minder plezierige eigenschappen voldeden de materialen behoorlijk; de onderlinge verschillen bleken van sekundaire invloed.

De optredende ontgrondingen werden gemeten in de gootas op afstanden van 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,2, 1,6, 2,0, 2,6, 3,2, 4,0, 5,0, 6,0, 8,0, 10,0 en 12,0 maal de waterdiepte  $h_0$ , gerekend vanaf het benedenstroomse einde van de bodemverdediging ( $x = 0$ ). Ter plaatse van het diepste punt werd ook in dwarsrichting op afstanden  $0,1 h_0$  de ontgrondingsdiepte gemeten. Met behulp hiervan kon een correctie op de maximale ontgrondingsdiepte worden aangebracht, indien de ontgroning in de breedterichting ongelijkmatigheden vertoonde. Alle vermelde waarden van  $h_{\max}$  zijn gekorrigeerd met de faktor  $h_{\max}(\text{gemidd.})/h_{\max}(\text{as})$ .

Bij elke combinatie van geometrie, waterdiepte en bodemmateriaal werden 4 à 6 ontgrondingsproeven gedaan met verschillende stroomsnelheden. Om de overeenkomst in stroomcondities tussen de verschillende proeven te kunnen verifiëren werd bij elke proef de verticale snelheidsverdeling bepaald in de as van de goot ter plaatse van het einde van de verdediging. De snelheden werden doorgaans gemeten met behulp van een mikromolen in 10 à 15 punten in de vertikaal. In de stroomgoot van De Voorst stuitte het gebruik van de mikromolen echter op bezwaren, daar het signaal al gauw onbetrouwbaar werd door vervuiling van het instrument. De snelheidsmetingen daar zijn gedaan met pitotbuizen, en met de zogenaamde "hengelmolen", bestaande uit een propeller gelagerd op een dunne draad. Met de hengelmolen wordt de snelheidsvektor gemeten doordat het instrument zich in de stroomrichting kan plaatsen; in een turbulente stroming is de aanwijzing daardoor groter dan van de mikromolen, die wegens zijn gefixeerde stand en zijn cosinus-karakteristiek alleen de axiale komponent aangeeft.

Behalve de over de tijd gemiddelde waarde  $\bar{u}$  van de stroomsnelheid werden ook de turbulente snelheidsfluctuaties geregistreerd en hieruit de turbulentie-intensiteit  $u' = \sqrt{(u - \bar{u})^2}$  in elk meetpunt afgeleid. Door de uitkomsten van alle meetpunten in een vertikaal te combineren, kon voor elk geval uit de meetgegevens de relatieve gemiddelde turbulentie-intensiteit

$$r = \frac{\sum u'(y)}{\sum \bar{u}(y)} \quad (\text{vgl. figuur 7})$$

worden bepaald. Zowel met de mikromolen als met de hengelmolen kon deze informatie worden verkregen.

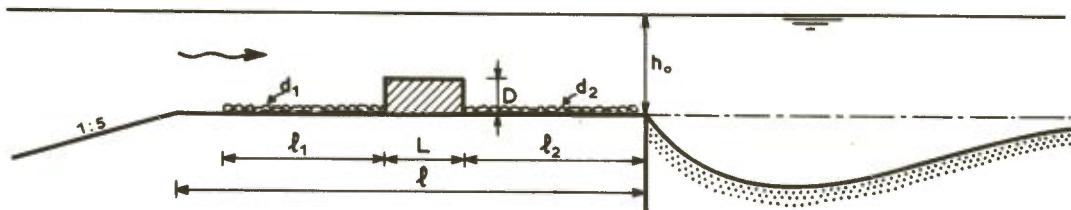
De stroomsnelheden werden geregeld door bij een gekozen waterdiepte een konstant debiet toe te voeren. In de kleine glazen goot werd het gewenste debiet ingesteld met behulp van een cirkelstuw, in de grote glazen goot met behulp van een geijkt bochtstuk. De debieten in de stroomgoot van De Voorst werden tijdens de proef globaal ingesteld en naderhand door middel van integratie van de pitotbuiswaarnemingen exakt bepaald.

### 3.2. Overzicht van de verrichte proeven

De proeven zijn uitgevoerd in series. Elke serie wordt gekenmerkt door één bepaalde geometrie (ruwheid en lengte van de bodembescherming, lengte en hoogte van eventueel aanwezige drempel). Bij deze geometrie is dan in het algemeen hetzij de lengteschaal, hetzij het bodemmateriaal gevarieerd; soms ook beide. In de meeste situaties is de ontgroning bij een aantal verschillende stroomsnelheden onderzocht. Een overzicht van de onderzochte series met bijbehorende kenmerken en de aantallen gestroomde proeven is gegeven in figuur 14. Een complete lijst van alle proeven die voor verdere uitwerking in aanmerking kwamen is in de bijlagen II-1 vervat.

Bij de series 8 en 11 was het erom te doen het verloop van de ontgroning met de tijd nader te onderzoeken en een hiervoor uit het vooronderzoek afgeleide betrekking te toetsen. Tevens dienden deze series als eerste oriëntatie met betrekking tot de invloeden van de lengteschaal en van de snelheidsschaal. Ook de series 13 en 14 werden met het oog op de genoemde schaalinvloeden uitgevoerd.

In de series 15, 16A/B en 17A/B werd de invloed van het bodemmateriaal op de ontgroningstijd nagegaan. Zowel korreldiameter als dichtheid van het materiaal werden in deze series systematisch gevarieerd. Uit de resultaten kon niet alleen de



serie	$\frac{D}{h_o}$	$\frac{L}{h_o}$	$\frac{d_1}{h_o}$	$\frac{l_1}{h_o}$	$\frac{d_2}{h_o}$	$\frac{l_2}{h_o}$	$\frac{l}{h_o}$	$h_o$ (m)	aantal proeven		
									zand	bakeliet	polystyreen
8	0	-	-	-	0	-	ca 9	0,15 0,30 0,60	4	3	4 10 6
11	0,33	0,7	0	-	0,03	4	ca 9	0,30 0,60	6		5 4
13	0,50	0,7	0	-	0,05	4	ca 9	0,20 0,40			6 6
14	0	-	-	-	0,07	8	ca 9 ca 9	0,15 0,30			4 4
15	0	-	-	-	0,04	8	ca 9	0,25	23	7	5
16A	0,17	0,7	0,03	4	0,03	4	ca 9	0,30	11	7	5
16B	0,17	0,7	0	-	0,03	4	ca 9	0,30	12		
17A	0,33	0,7	0,03	4	0,03	4	ca 9	0,30	6	6	5
17B	0,33	0,7	0	-	0,03	4	ca 9	0,30	6		2
19	0	-	-	-	0,03	12	12	0,125 0,25 0,50 1,50			5 5 4
20	0,23	0,8	0,03	6,5	0,03	4,7	12	0,25 0,50 1,50	3 2 3		
21	0,33	0,8	0,03	6,5	0,03	4,7	12	0,25 0,50 1,50	1 1 1		
22	0	-	-	-	0	-	12	0,25 0,50 1,50	2 2 2		4
23	0	-	-	-	0	-	2	0,25			4
24	0	-	-	-	0	-	8	0,25			4
25	0	-	-	-	0	-	14	0,25			5
26	0	-	-	-	0,003	14	14	0,25			5
27	0	-	-	-	0,006	14	14	0,25			5
28	0	-	-	-	0,01	14	14	0,25			5
29	0	-	-	-	0,02	14	14	0,25			5
30	0	-	-	-	0,04	14	14	0,25			5
31	0	-	-	-	0,08	14	14	0,25			5
37	0	-	-	-	0,12	14	14	0,25			5

Figuur 14 Overzicht van de onderzochte situaties (M 648)



materiaalinvloed worden gedestilleerd, maar bovendien een uitdrukking voor de invloed van de stroomsnelheid worden afgeleid.

De series 19 t/m 22 hadden opnieuw betrekking op de lengteschaal. Door inschakeling van de grote stroomgoot in het Laboratorium De Voorst kon de schaalvariatie worden vergroot, waardoor de betrouwbaarheid en geldigheid van de uit vroegere proeven verkregen resultaten beter kon worden gefundeerd.

Bij de series 23 t/m 31 en 37 tenslotte werd op meer systematische wijze dan tot dusver aandacht besteed aan de invloed van lengte en ruwheid van de bodembescherming. Hierbij werd niet alleen gelet op de snelheid waarmee de ontgronding zich in de verschillende varianten ontwikkelde, maar tevens op de vorm van de ontgrondingskuil en de steilheid van de aanzethelling.

In het hiernavolgende zullen de resultaten van deze proeven meer in detail worden besproken.

### 3.3. Resultaten van het onderzoek

#### 3.3.1. Verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd

Bij het onderzoek naar de reproduceerbaarheid op schaal van het ontgrondingsproces is gebleken, dat in de ontwikkelingsfase van dit proces de gelijkvormigheid van de ontgrondingskuilen in model en prototype - noodzakelijke voorwaarde voor het kunnen definiëren van een tijdschaal - onder uiteenlopende omstandigheden van waterdiepte, stroomsnelheid en bodemmateriaal gehandhaafd blijft (zie paragraaf 2.2.). Dit houdt in, dat het gehele ontgrondingsproces volledig bepaald is, wanneer voor één punt van de ontgrondingskuil het verloop van de kuildiepte met de tijd gegeven is. Omdat de mate van uitschuring het best met de maximale kuildiepte kan worden aangegeven, ligt het voor de hand te trachten de bepaling van het ontgrondingsproces aan het gedrag van het diepste punt van de ontgrondingskuil te koppelen.

Uit het vooronderzoek is gevonden, dat de afhankelijkheid van de ontgrondingsdiepte van plaats en tijd beschreven kan worden met de experimenteel bepaalde relatie:

$$\frac{h(x,t)}{h_o} = 0,075 \left(\frac{x}{h_o}\right)^{0,85} \cdot \ln \frac{t}{\tau \cdot \left(\frac{x}{h_o}\right)^{2,5}} \quad (3.1.)$$

die de analytisch uitdrukking vormt van de in figuur 9 aangegeven lijnenbundel (afgezien van de afbuigingen aan begin en eind). De omhullende van deze lijnenbundel geeft het verloop van de maximale kuildiepte met de tijd weer.

De vergelijking van deze omhullende volgt uit combinatie van relatie (3.1.) met de voor het diepste punt geldende voorwaarde

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial x} = 0$$

die leidt tot:

$$0,075 h_0^{0,15} \cdot \left[ 0,85 x^{-0,15} \cdot \ln \frac{t}{\tau} \left( \frac{h_0}{x} \right)^{2,5} + x^{0,85} \cdot \frac{\tau}{t} \left( \frac{x}{h_0} \right)^{2,5} \cdot \left( -2,5 \frac{h_0^{2,5}}{\tau x^{3,5}} \right) \right] = 0$$

waaruit voor  $x \neq 0$  volgt:

$$0,85 \ln \frac{t}{\tau} \left( \frac{h_0}{x_{\max}} \right)^{2,5} = 2,5 \longrightarrow \ln \frac{t}{\tau} \left( \frac{h_0}{x_{\max}} \right)^{2,5} = 2,94$$

Omgewerkt levert dit voor het verloop van de plaats van het diepste punt met de tijd de relatie:

$$\frac{x_{\max}(t)}{h_0} = e^{-1,18} \left( \frac{t}{\tau} \right)^{0,4} = 0,31 \left( \frac{t}{\tau} \right)^{0,4} \quad (3.2.)$$

Substitutie van relatie (3.2.) in relatie (3.1.) geeft dan het gezochte verband tussen maximale kuildiepte en tijd:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = 0,075 \left[ 0,31 \left( \frac{t}{\tau} \right)^{0,4} \right]^{0,85} \cdot 2,94 = 0,081 \left( \frac{t}{\tau} \right)^{0,34} \quad (3.3.)$$

Stelt men nog

$$\frac{\tau^{0,34}}{0,081} = t_1^{0,34}$$

dan wordt relatie (3.3.) vereenvoudigd tot:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0,34} \quad (3.4.)$$

Hierin stelt  $t_1$  de tijd voor, die het ontgrondingsproces nodig heeft om de maximale kuildiepte gelijk te laten worden aan de oorspronkelijke waterdiepte  $h_0$ . De maximale waterdiepte is dus op het tijdstip  $t = t_1$  gelijk aan tweemaal de oorspronkelijke waterdiepte.

Uit de combinatie van de relaties (3.2.) en (3.3.) volgt:

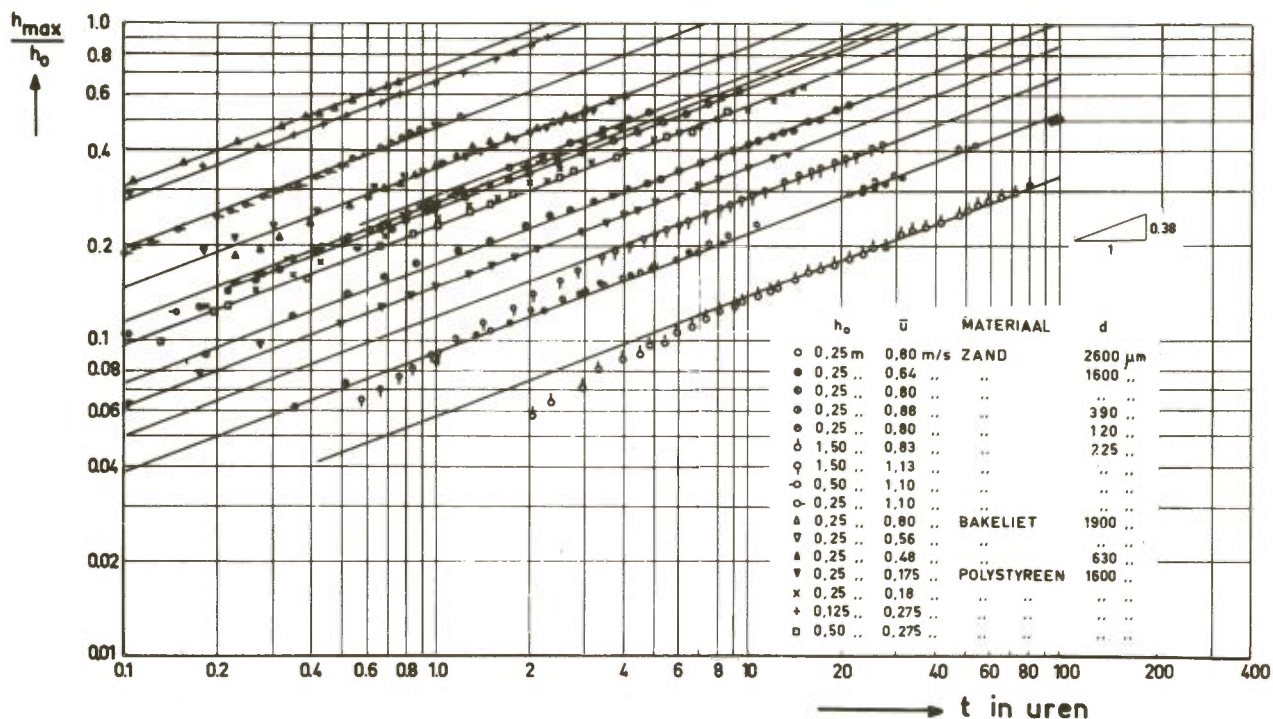
$$\frac{x_{\max}}{h_{\max}} = k \cdot t^{0,06} \quad (3.5.)$$

in overeenstemming met de waarneming, dat de verhouding  $x_{\max} : h_{\max}$  in de loop van de tijd nauwelijks verandert (vergelijk figuur 6) en het diepste punt zich vrijwel langs een rechte lijn beweegt.

Alle ontgrondingsproeven zijn geanalyseerd volgens relatie (3.4.). Het exponentiële verband blijkt in zeer uiteenlopende gevallen goed te voldoen, wat aan de hand van figuur 15 kan worden geconstateerd en voorts uit de bijlagen II-3a t/m 76a duidelijk moge worden.

Bij de meeste proeven werd voor de exponent een iets hogere waarde dan 0,34 gevonden, namelijk circa 0,38, zoals in figuur 15 staat aangegeven. In enkele gevallen bleek deze waarde aan de hoge kant en voldeed een exponent van ongeveer 0,32 beter. Dit was met name het geval bij die series, waarbij de proeven zijn doorgezet tot een maximale ontgrondingsdiepte bereikt was van  $0,8 h_0$  à  $1,0 h_0$ , in tegenstelling tot de overige proeven, die bij  $h_{\max} = 0,5 h_0$  à  $0,7 h_0$  zijn beëindigd. Dit verschijnsel, dat op de bijlagen II-5a, 6a, 13a en 14a enigszins tot uiting komt, wordt mogelijk verklaard door een zekere afname van de exponent met de tijd. Ook in literatuur [10] wordt bij de uitgevoerde duurproef voor  $h_{\max}/h_0 > 1$  een geleidelijke afname van de exponent met de tijd gevonden. Bij de hierna te behandelen driedimensionale ontgrondingen blijkt deze tendens nog veel nadrukkelijker.





Figuur 15 Maximale ontgrondingsdiepte als functie van de tijd (tweedimensionaal)

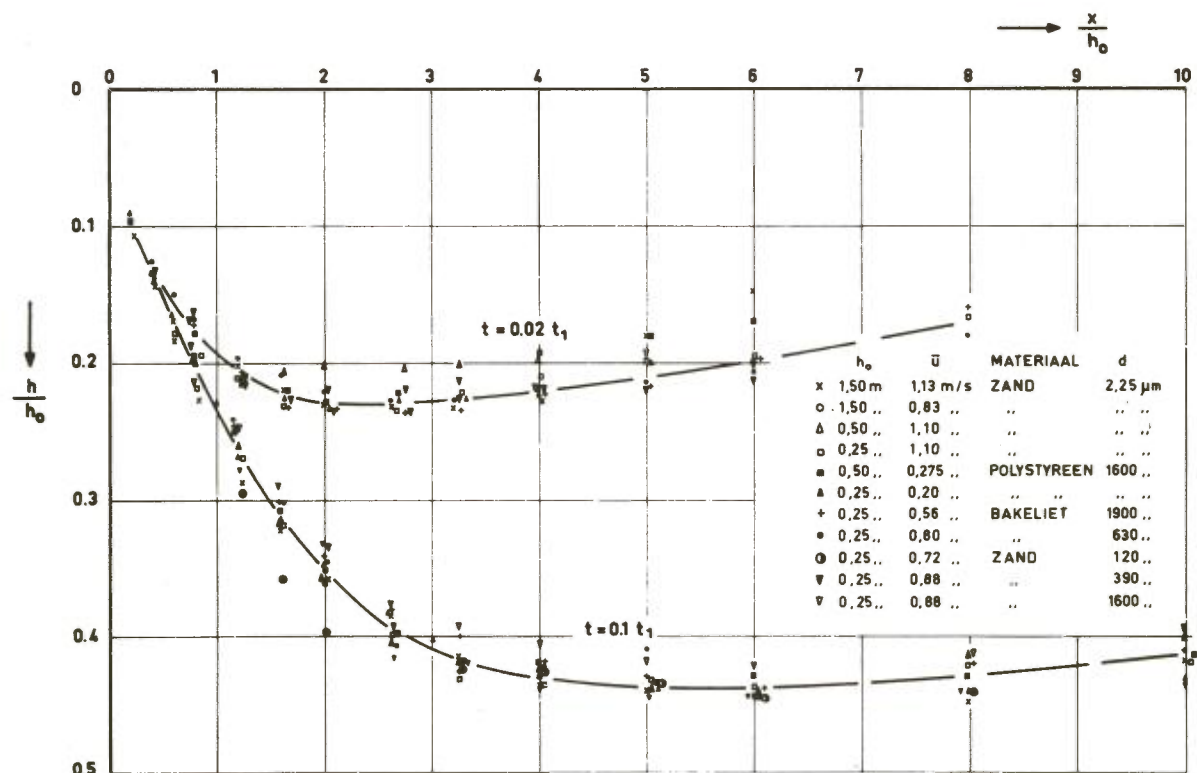
Ook de proeven met fijn zand ( $d_{50} = 120 \mu\text{m}$ ) vertonen een zekere afwijking van het algemene beeld (zie bijlagen II-9a, 17a, 26a en 38a), die zich behalve in de tijd-ontgrondingslijnen ook in de vorm van de ontgrondingskuilen manifesteert. Hierop wordt in paragraaf 3.3.6. nog teruggekomen. Genoemde afwijking hangt vermoedelijk samen met het relatief grote suspensietransport dat bij dit fijne materiaal optreedt; blijkbaar is hier een grens voor de afgeleide wetmatigheden van het ontgrondingsproces bereikt.

Deze berekingen in aanmerking genomen, kan worden gesteld, dat het verband tussen maximale kuil diepte en tijd bij tweedimensionale ontgrondingen goed kan worden weergegeven door de relatie:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0,38} \quad (3.6.)$$

Gezien het slechts geringe verschil met de uit het gelijkvormigheidsonderzoek afgeleide betrekking (3.4.) mag worden verwacht, dat de met (3.6.) gedefiniëerde grootheid  $t_1$  bepalend is voor de ontgroning in zijn geheel. Dat dit inderdaad met grote benade-

ring het geval is, kan aan figuur 16 worden geverifieerd, waarin voor zeer uiteenlopende kondities van stroom en bodemmateriaal de ontgrondingsprofielen, gemeten bij gelijke verhoudingen van  $t/t_1$ , zijn afgebeeld.



Figuur 16 Ontgrondingsprofielen bij konstante verhoudingen van  $t/t_1$

De waarde van  $t_1$  kan dus worden gebruikt om ontgrondingen onder verschillende kondities met elkaar te vergelijken, zodat het zinvol is de grootte  $t_1$  als basis te kiezen voor de tijdschaal van het ontgrondingsproces. Deze tijdschaal wordt dan gevonden uit de verhouding van de  $t_1$ -waarden in prototype en model of van twee modelproeven onderling, waarbij de ene proef als prototype voor de ander dient.

Hoe de waarde van  $t_1$  afhangt van de stroom- en materiaaleigenschappen is het volgende punt van onderzoek.

### 3.3.2. Invloed van de stroomsnelheid op de ontgrondingstijd

Reeds bij de eerste proevenseries werd geconstateerd dat het ontgrondingsverschijnsel zeer gevoelig reageert op de stroomsnelheid van het water. Een relatief kleine verandering van de stroomsnelheid heeft al dadelijk een duidelijke invloed op het

tempo van het ontgrondingsproces. Hoe sterker de stroom, des te sneller het proces verloopt, en des te kleiner dus de waarde van  $t_1$  wordt, die immers de tijdsduur aangeeft waarin de ontgroning een vastgestelde omvang ( $h_{\max} = h_0$ ) bereikt. Uit een eerste oriënterende benadering bleek, dat  $t_1$  ongeveer afneemt met de  $5^e$  à  $7^e$  macht van  $\bar{u}$ . Onder overigens gelijkblijvende omstandigheden zou dus gelden

$$t_1 = k \cdot \bar{u}^{-(5 \text{ à } 7)} \quad (3.7.)$$

Deze benadering was echter nog te grof om tot een bevredigende uitdrukking te komen voor de invloed van de stroom op het ontgrondingsproces. Hierbij is namelijk (zie paragraaf 2.1.) niet alleen de gemiddelde stroomsnelheid bepalend, maar speelt ook de turbulentie-intensiteit een belangrijke rol. Het was duidelijk dat deze turbulentie-invloed op een of andere wijze in rekening moest worden gebracht.

Aanvankelijk lukte dit niet zodanig, dat een betere uitdrukking voor (3.7.) gevonden werd. Hierin kwam verandering, nadat de proeven met verschillende bodemmaterialen (series 15 t/m 17) waren uitgevoerd. Bij de analyse van de hieruit verkregen meetresultaten werd de aandacht getrokken door de eigenaardige invloed van de korreldiameter  $d$  op de ontgroningstijd  $t_1$ . Het verband tussen deze twee grootheden, dat voor een aantal gevallen is afgebeeld in figuur 17, bleek een karakteristiek te vertonen, die associaties wekte met de door Shields aangegeven voorwaarde voor het begin van beweging, wanneer men deze uitzet als een relatie tussen  $u_{*kr}$  en  $d$  bij konstant gehouden  $\Delta$  en  $\gamma$ . Hieruit ontstond het vermoeden, dat door introductie van de kritieke schuifspanningssnelheid  $u_{*kr}$  of de daaruit volgens betrekking (2.13.) af te leiden kritieke gemiddelde snelheid  $\bar{u}_{kr}$  een betere beschrijving van het ontgrondingsproces verkregen zou kunnen worden. Onderzoek in deze richting bevestigde dit vermoeden. Voor de series 15 t/m 17 bleek namelijk de invloed van de stroomcondities op de ontgroningstijd  $t_1$  goed weergegeven te kunnen worden door de relatie:

$$t_1 = k \cdot (u_{\max} - u_{kr})^{-4} \quad (3.8.)$$

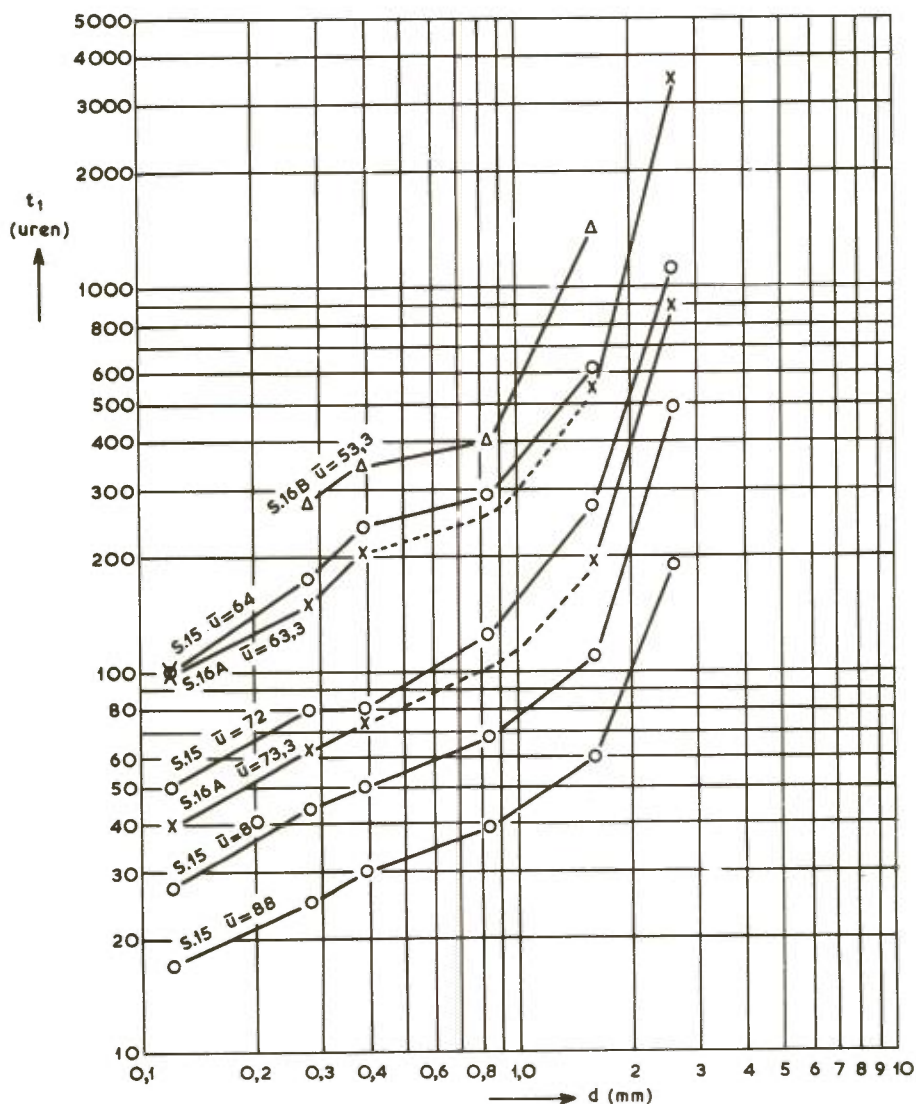
waarin  $u_{\max} = (1 + 3r) \bar{u} = \alpha_r \bar{u}$

$$r = \frac{\sum u'(y)}{\sum \bar{u}(y)}$$

en  $u_{kr} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot u_{*kr}$

gesteld is en  $k$  een konstante voorstelt waarvan de grootte wordt bepaald door de dichtheid  $\rho_s$  van het bodemmateriaal en de waterdiepte  $h_0$ .





Figuur 17 Invloed van de korreldiameter op de ontgrondingstijd

De grootte  $\alpha_r = (1 + 3r)$  is een uit de meetresultaten afgeleide vergrotingsfactor, waarmee de gemiddelde snelheid vermenigvuldigd moet worden om een eenduidig verband met de ontgrondingstijd te kunnen formuleren. De getalwaarde van deze faktor, die mede door de keuze van de exponent van  $(u_{\max} - u_{kr})$  wordt beïnvloed, bleek bij de beschouwde series rechtstreeks te koppelen aan de grootte van de relatieve gemiddelde turbulentie-intensiteit  $r$ , waardoor voor het ontgrondingsproces niet  $\bar{u}$  maar  $\bar{u} + 3u'$  als maat voor de stroomsterkte naar voren treedt. Hier komt de versterkende invloed tot uiting die de turbulentie uitoefent op het in beweging brengen van het bodemmateriaal (zie paragraaf 2.3.). De faktor 3 in het turbulentie-aandeel is daarbij in feite willekeurig en tot op zekere hoogte een gevolg van de formulering van betrekking (3.8.); fysisch kan men de waarde  $\bar{u} + 3u'$  als de orde van

grootte van de maximale snelheidspiek interpreteren.

Niet voor alle onderzochte situaties bleek relatie (3.8.) zonder meer te gelden. In tegenstelling tot gevallen met een ruwe bodemverdediging, waarvoor het opgestelde verband goed voldeed, was bij de aanstroming over een gladde bodem de uitdrukking  $(\alpha_r \bar{u} - u_{kr})$  onvoldoende om de invloed van de turbulente stroom op de ontgronding weer te geven. In deze situaties, die gekenmerkt worden door een relatief geringe turbulentie-intensiteit en een "vol" snelheidsprofiel (zie als voorbeeld bijlage II-68a tegenover bijlage II-75a), bleek het noodzakelijk nog een correctiefactor  $\alpha_u$  aan  $\bar{u}$  toe te voegen, die als een uitdrukking voor de invloed van de relatief hoge bodemsnelheid kan worden beschouwd. De aangepaste relatie tussen stroomsnelheid en ontgrondingstijd luidde dus:

$$t_1 = k \cdot (\alpha_{tot} \bar{u} - u_{kr})^{-4} \quad (3.9.)$$

met  $\alpha_{tot} = \alpha_r \cdot \alpha_u$

$$\alpha_r = 1 + 3r$$

$\alpha_u$  = correctiefactor voor het snelheidsprofiel.

Behalve de turbulentie-graad is dus ook de verticale snelheidsverdeling voor het ontgrondingsproces van belang.

Het bleek echter, ook na voortgezet onderzoek, niet mogelijk om een eenduidige korrelatie aan te geven tussen de vorm van het snelheidsprofiel en de grootte  $\alpha_u$ . Hiermee verviel in principe de mogelijkheid om langs rekenkundige weg uit de snelheids- en turbulentiemetingen de grootte van  $\alpha_{tot}$  en daarmee van  $t_1$  te bepalen. Daardoor werd in feite ook de zin ontnomen aan de pogingen om, teneinde de moeilijke en omslachtige turbulentiemetingen te omzeilen, de relatieve turbulentie-intensiteit rechtstreeks uit de geometrie van bodemverdediging en drempelconstructie af te leiden. Bodem deze pogingen voor geschematiseerde situaties nog een zeker perspectief, met het oog op de toepassing op de grillige driedimensionale geometrieën in de natuur kon hieraan toch weinig betekenis worden toegekend en was bovendien het einde zoek.

Een betere methode leek daarom, af te zien van de specificatie van de diverse  $\alpha$ -invloeden en deze samen te vatten in één algemene "correctie"-factor  $\alpha$ . Deze grootte  $\alpha$  is dan te beschouwen als een kenmerkende, zij het niet rechtstreeks berekenbare, uitdrukking voor de invloed van de geometrie, die immers zowel de turbulentie als de snelheidsverdeling van de aanstroming bepaalt. De grootte van  $\alpha$ , die bij ontgronding in een geometrisch gelijkvormig model schaalonafhankelijk is, moet dan worden afgeleid uit de met behulp van een modelproef bepaalde waarde van  $t_1$ .

Dit is, zeker bij gekompliceerdere geometrieën, ook veel betrouwbaarder dan een schatting van  $a$  op grond van snelheidsmetingen, iets wat voor de hierna aan de orde komende driedimensionale ontgrondingen nog in versterkte mate geldt.

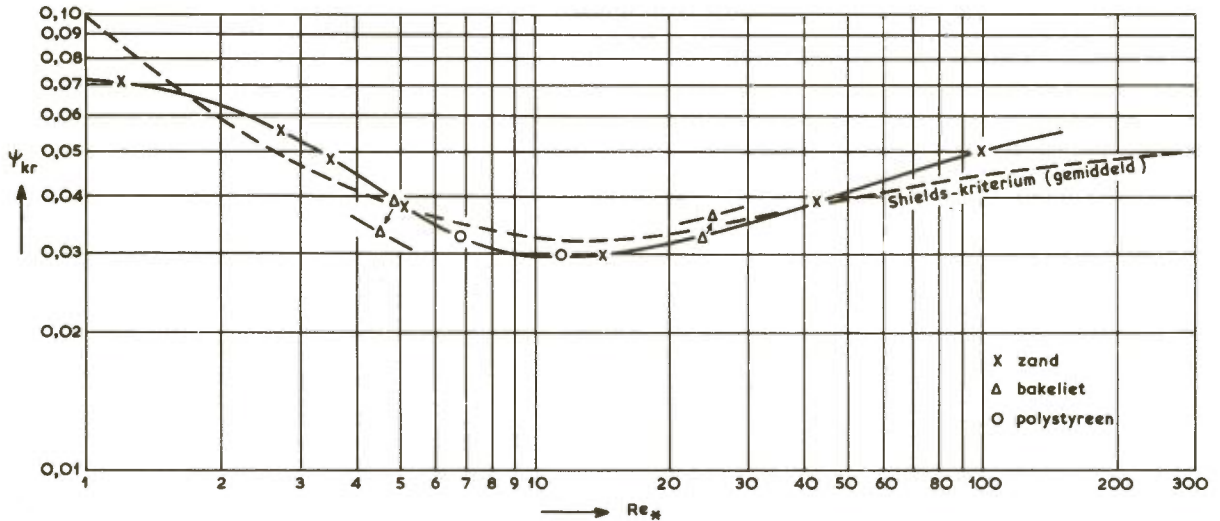
De grootte van de kritieke snelheid  $u_{kr}$  in relatie (3.9.), die voor het betreffende bodemmateriaal korrespondeert met het begin van beweging in een eenparige parallelstroom, is berekend met behulp van de weerstandscoefficiënt  $\lambda$ , die reeds in paragraaf 2.3. voor dit doel is geïntroduceerd. Bij de bepaling van  $\lambda$  is de ruwheidsmaat  $k_s$  steeds gelijk gekozen aan de uit het korreldiagram af te lezen waarde van  $d_{50}$  (zie bijlage II-2) en is de grootte  $D$  gelijk gesteld aan viermaal de hydraulische straal  $R$  van het dwarsprofiel van de stroom. De viscositeit  $\nu$  is uit de (eventueel geschatte) watertemperatuur afgeleid, terwijl voor de snelheid  $u$  altijd  $\bar{u} = Q/bh_0$  is aangehouden.

Voorts moest voor de bepaling van  $u_{kr}$  naast  $\lambda$  de grootte van  $u_{*kr}$  worden vastgesteld. Aanvankelijk werd hiervoor voor de onderzochte materialen uitgegaan van getalwaarden die ongeveer overeenkwamen met die volgens het Shields-kriterium, maar daar toch wel op een enigszins willekeurige manier van afweken. Dit was uiteraard een onbevredigende situatie, daar bij toepassing van andere dan de reeds gebruikte materialen geen duidelijke aanwijzing voorhanden was hoe  $u_{*kr}$  te bepalen. Om hierin te voorzien is, op grond van het in paragraaf 2.3. beschreven onderzoek naar het begin van beweging, een principe-afspraken voor de bepaling van  $u_{*kr}$  gemaakt. Gekozen is, min of meer arbitrair, de lijn volgens criterium 6 in figuur 13 als basis voor de berekening; de keuze is in hoofdzaak ingegeven door het feit dat van de 7 geïntroduceerde criteria dit criterium het meest met dat van Shields korrespondeert. Dit blijkt uit figuur 18, waarin het aangehouden criterium voor  $u_{*kr}$  samen met het gemiddelde van de door Shields aangegeven band is afgebeeld.

Bij het onderzoek naar het begin van beweging bleek, dat met name de twee bakeliet-mengsels een enigszins afwijkend gedrag vertoonden. Dit afwijkende gedrag, te konstateren aan de hand van figuur 13, uitte zich bij het fijne bakeliet in een verlaging van de kritieke snelheid ten opzichte van de genormaliseerde waarde, bij het grove bakeliet in een verhoging daarvan. Mogelijk zijn deze afwijkingen een gevolg van de verschillen in de "sekundaire materiaaleigenschappen" als korrelvorm, gradering en homogeniteit tussen bakeliet en de andere materialen, waarvan in paragraaf 3.1. melding is gemaakt. Ofschoon een sluitende verklaring niet kon worden gevonden, bleken de gesignaleerde afwijkingen konsekwent op te treden, daar ook uit de resultaten van het ontgrondingsonderzoek dezelfde tendens tot verlaging, respectievelijk verhoging van  $u_{kr}$  aan de dag trad. Daarom is besloten voor het bakeliet een correctie in bovengenoemde zin toe te passen op de in figuur 18 getrokken



standaardlijn; deze correcties zijn eveneens in de figuur aangegeven.



materiaal	$\Delta$	$d_{50}$	$u_{*kr}$
zand	1,65	120 $\mu\text{m}$	1,20 cm/s
		225	1,44
		280	1,50
		390	1,56
		840	2,02
		1600	3,20
		2600	4,60
bakeliet	0,36	630	0,86
		1900	1,58
polystyreen	0,05	1600	0,51

$$\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

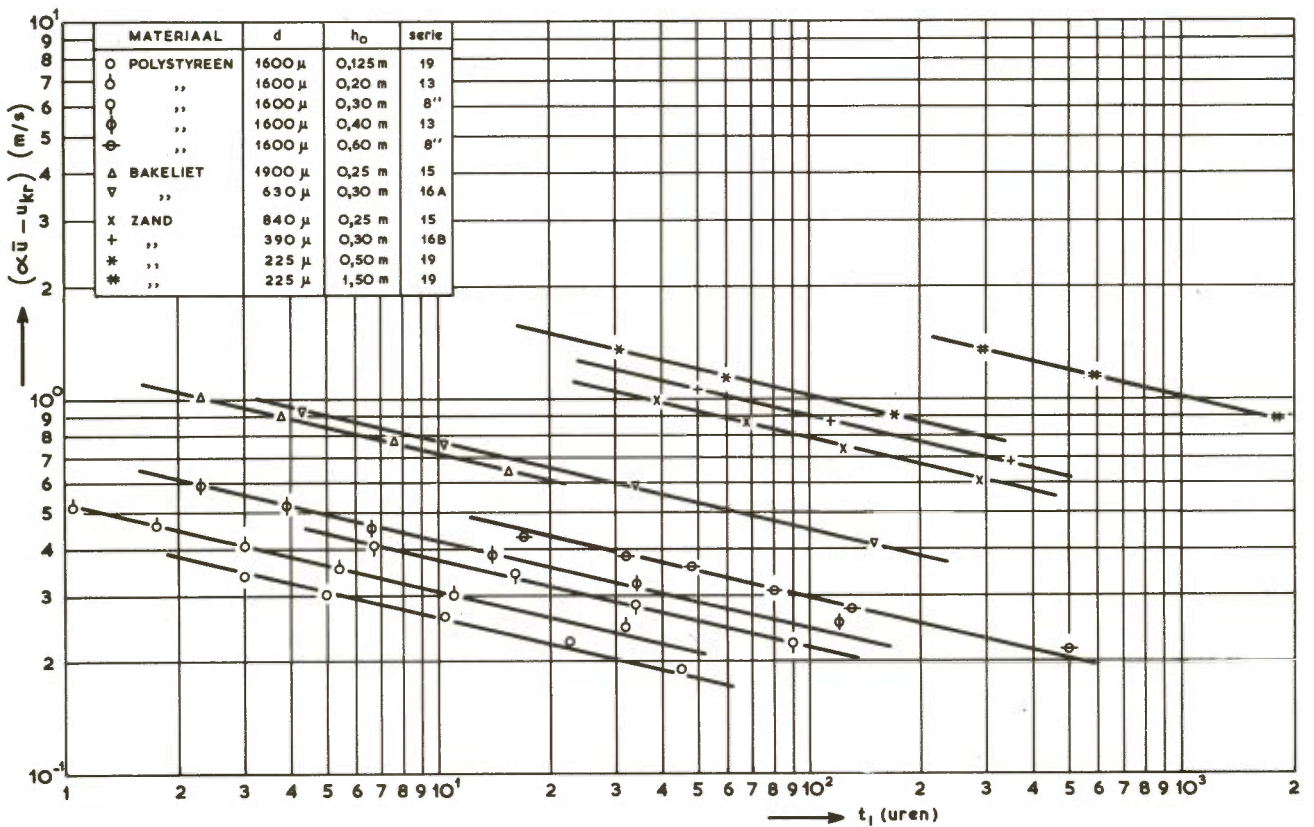
Figuur 18 Aangehouden criterium voor het begin van beweging

De herziene afleiding van  $u_{*kr}$  maakte het nodig relatie (3.9.) opnieuw te toetsen aan het waarnemingsmateriaal. Door de ontkoppeling van de getalwaarde van  $a$  van de snelheidsregistraties werd bovendien de mogelijkheid geopend vrijer om te gaan met de exponent van  $(\bar{a}u - u_{*kr})$  en hiervoor die waarde op te zoeken die het beste aansluit bij de meetresultaten van alle ontgrondingsproeven. Daartoe is

een optimaliseringsberekening uitgevoerd, waarbij naast de belangrijkste proevenseries van het tweedimensionale onderzoek ook de inmiddels verkregen uitkomsten van het driedimensionale onderzoek werden betrokken. Als enige voorwaarde voor de relatie tussen  $t_1$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$  werd gesteld, dat voor overeenkomstige geometrieën een gelijke  $\alpha$  moest gelden. Het resultaat van deze berekening leverde als optimale relatie voor de ongeveer 220 beschouwde gevallen tezamen:

$$t_1 = k \cdot (\bar{a}u - u_{kr})^{-4,3} \tag{3.10.}$$

welke relatie nadien als uitdrukking voor de invloed van de stroomsnelheid op de ontgrondingstijd is gehandhaafd. In figuur 19 is dit resultaat in beeld gebracht voor een aantal geselecteerde series.



Figuur 19 Verband tussen  $t_1$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$

### 3.3.3. Invloed van het bodemmateriaal op de ontgrondingstijd

In het voorgaande, waarbij de invloed van de stroom op het tempo van de ontgronding werd nagegaan, bleek het noodzakelijk gelijktijdig hiermee ook reeds een kenmerk van het bodemmateriaal te introduceren in de vorm van de grootheid  $u_{*kr}$ . Dit was een min of meer onvoorzien resultaat van het onderzoek naar de invloed van de korreldiameter op de ontgrondingstijd (series 15 t/m 17). Toch kostte het, achteraf gezien, weinig moeite dit resultaat aannemelijk te maken, gezien hetgeen in het kader van de studie naar het begin van beweging over de transportcapaciteit van de stroom is opgemerkt. De uitdrukking  $(\alpha \bar{u} - u_{kr})$  vertoont veel gelijkenis met de in paragraaf 2.3. afgeleide parameter  $(\Psi - \Psi_{kr})$  die, aangepast voor een stroom met verhoogde turbulentie, uitgebreid zou kunnen worden tot  $(\alpha \Psi - \Psi_{kr})$ . Beide grootheden zijn evenwel niet geheel identiek, daar wegens

$$(\alpha \Psi - \Psi_{kr}) = \frac{1}{\Delta g d} (\alpha u_*^2 - u_{*kr}^2) = \frac{\lambda}{8 g \Delta d} (\alpha \bar{u}^2 - u_{kr}^2)$$

voor een bepaald bodemmateriaal geldt:

$$(\alpha \Psi - \Psi_{kr}) \sim \lambda (\alpha \bar{u}^2 - u_{kr}^2) \quad (3.11.)$$

Vanuit het gezichtspunt van schuifspanning als oorzaak van het materiaaltransport moet aan  $\lambda (\alpha \bar{u}^2 - u_{kr}^2)$  als uitdrukking voor de invloed van de stroomsnelheid de voorkeur worden gegeven boven  $(\alpha \bar{u} - u_{kr})$ . De eerste zou wegens relatie (3.11.) ook beter aansluiten bij de gangbare transportformules. In verband hiermee is onderzocht, of met deze iets andere formulering de ontgrondingsproeven eveneens beschreven zouden kunnen worden. Daartoe zijn de  $t_1$ -waarden uit serie 15 (ruwe vlakke bodem,  $h_0 = 0,25$  m), bij welke serie zowel stroomsnelheid als bodemmateriaal zijn gevarieerd, volgens de uitdrukking  $\lambda (\alpha \bar{u}^2 - u_{kr}^2)$  geanalyseerd. De uitkomst was positief en leverde als resultaat de relatie

$$t_1 = k' \cdot \left[ \lambda (\alpha \bar{u}^2 - u_{kr}^2) \right]^{-2,9} \quad (3.12.)$$



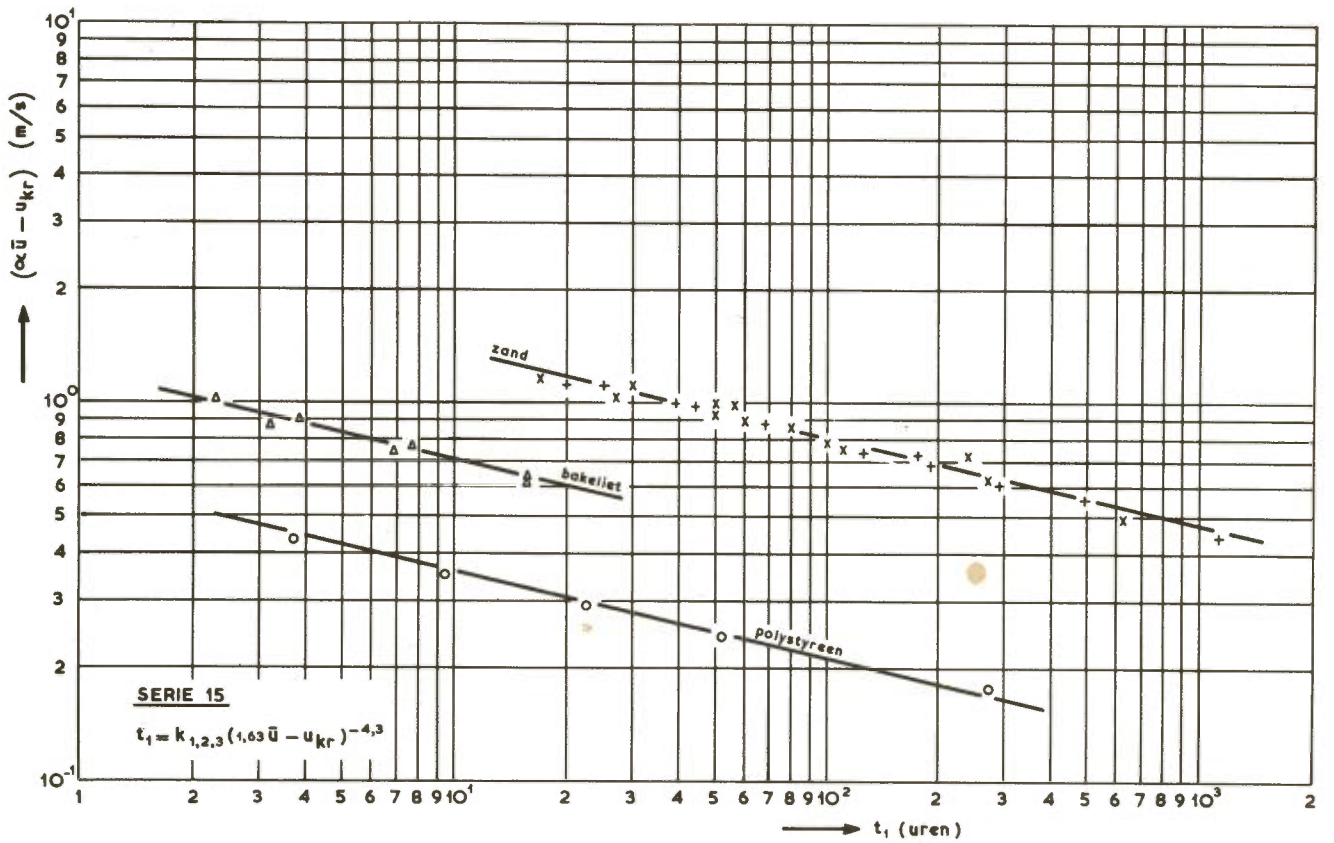
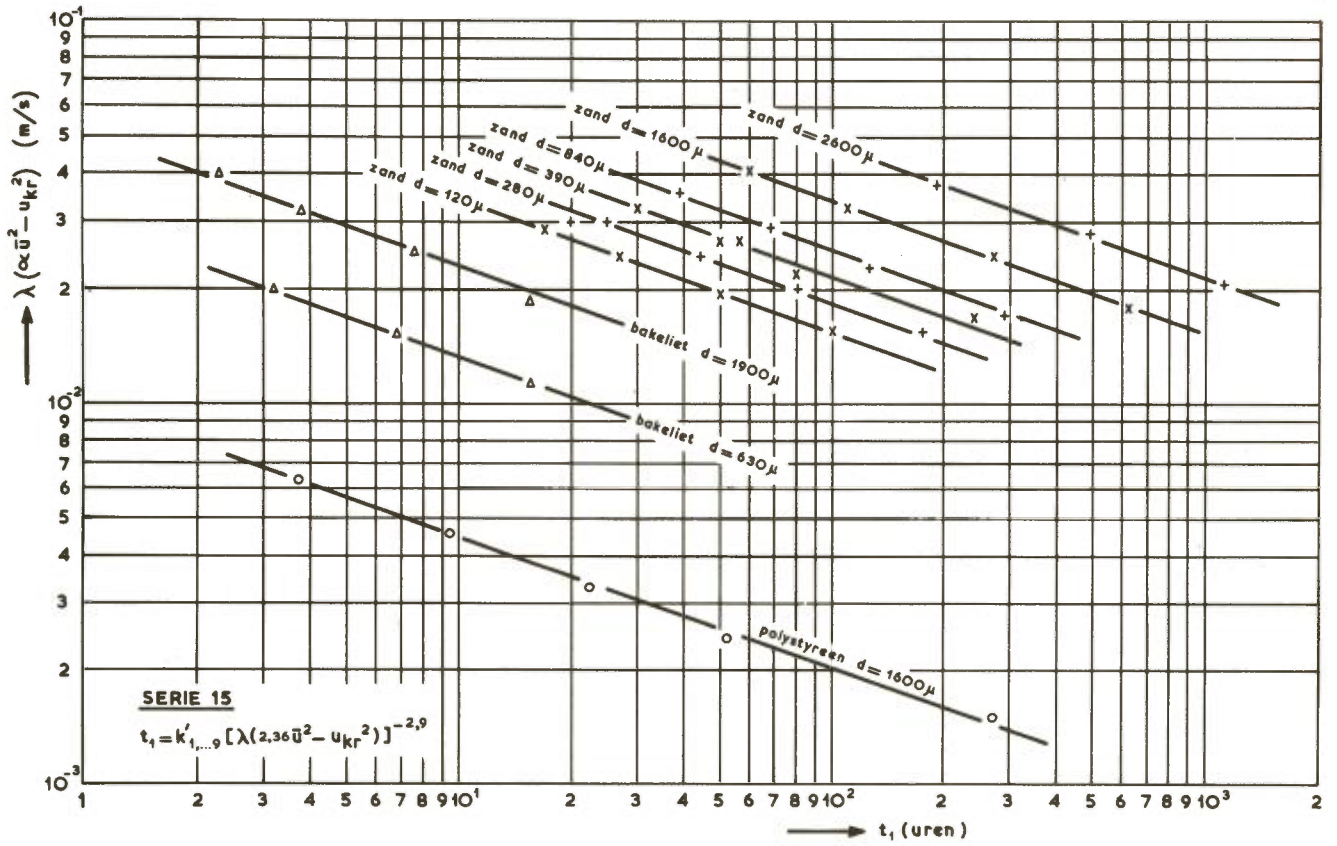
waarmee een even goede beschrijving van de stroomsnelheidsinvloed werd verkregen als met relatie (3.10.).

In een ander opzicht bleek daarentegen een belangrijk verschil tussen beide beschrijvingswijzen te bestaan. Dit betrof de manier waarop de samenhang tussen de ontgrondingstijd en de eigenschappen van het bodemmateriaal kan worden uitgedrukt. In geval relatie (3.12.) wordt gebruikt, blijft in de koëfficiënt  $k'$  nog een invloed aanwezig van zowel korreldiameter als dichtheid van het bodemmateriaal. Bij toepassing van relatie (3.10.) echter is de invloed van de korreldiameter reeds in de grootte  $(\bar{a}u - u_{kr})$  verdisconteerd en hangt  $k$ , voorzover de materiaaleigenschappen aangaat, nog uitsluitend van de dichtheid van het bodemmateriaal af. In figuur 20 is dit verschil geïllustreerd.

Niet alleen is de materiaalinvloed op de ontgrondingstijd bij gebruik van relatie (3.10.) dus eenvoudiger te formuleren, in het andere geval kon voor het verband tussen  $t_1$  en de korreldiameter zelfs in het geheel geen bevredigende uitdrukking worden gevonden. Op grond hiervan is, ondanks de minder goede aansluiting aan de bestaande bodemtransportformules, voor de beschrijving van het ontgrondingsverschijnsel toch de uitdrukking  $(\bar{a}u - u_{kr})$  verkozen.

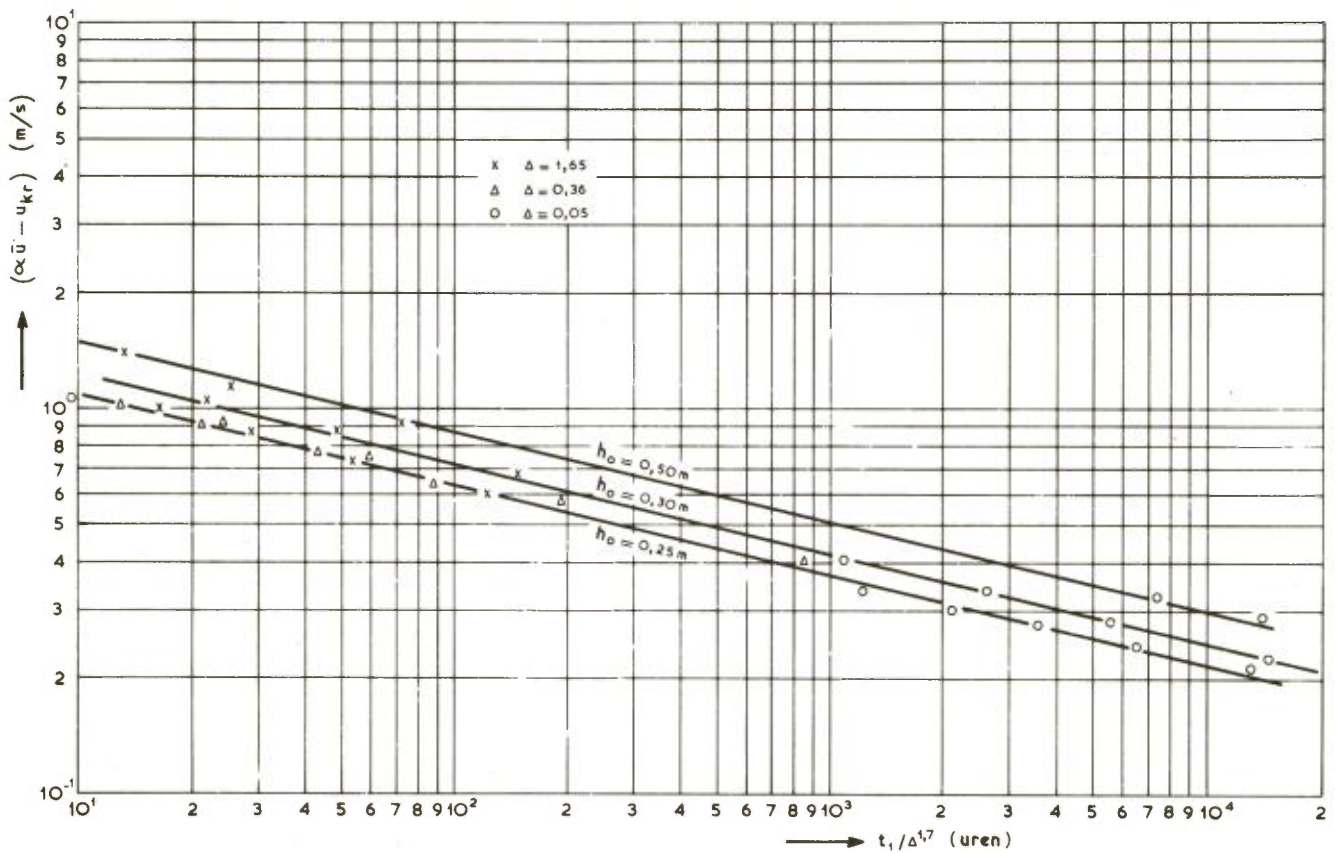
Door deze keus kon dus de invloed van de korreldiameter verder buiten beschouwing blijven en restte nog slechts de vraag naar de invloed van de materiaaldichtheid op de ontgrondingstijd. Ten dele is deze invloed ook reeds gevat in de grootte  $(\bar{a}u - u_{kr})$ , daar  $u_{kr}$  mede door de dichtheid van het betreffende bodemmateriaal wordt bepaald. Zoals uit figuur 20 (onder) is af te lezen, blijft echter daarnaast nog een expliciete invloed van  $\rho_s$ , of de daaruit afgeleide grootte  $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ , op de waarde van  $t_1$  over. Uit de proeven van de series 15 t/m 17 en 19 (zie de bijlagen II-17a t/m 56a) bleek deze dichtheidsinvloed voor de drie onderzochte materialen zand ( $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta = 1,65$ ), bakeliet ( $\rho_s = 1360 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta = 0,36$ ) en polystyreen ( $\rho_s = 1050 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta = 0,05$ ) met redelijke benadering uit te drukken in een machts-functie van  $\Delta$ . De grootte van de exponent bleek enigszins te worden beïnvloed door de waarde van  $u_{kr}$ , wat door de relatie tussen  $u_{kr}$  en  $\Delta$  wordt verklaard. Bij de berekening van  $u_{kr}$  op grond van het in figuur 18 weergegeven criterium voor  $\psi_{kr}$  sluit een exponent van 1,6 à 1,7 het beste bij de meetresultaten van het tweedimensionale onderzoek. Gezien de uitkomsten van het later verrichte driedimensionale ontgrondingsonderzoek, waarbij voor dezelfde bodemmaterialen de iets hogere macht van 1,7 à 1,8 voor  $\Delta$  beter blijkt te voldoen, werd als optimale beschrijving voor beide onderzoeken tezamen aangehouden:

$$t_1 = k \cdot \Delta^{1,7} \cdot (\bar{a}u - u_{kr})^{-4,3} \quad (3.13.)$$



Figuur 20 Weergave van de materiaalinvloed op de ontgrondingstijd

Deze relatie is in figuur 21 geïllustreerd door de grootheden  $t_1 / \Delta^{1,7}$  en  $(\bar{u} - u_{kr})$  tegen elkaar uit te zetten.



Figuur 21 Verband tussen  $t_1 / \Delta^{1,7}$  en  $(\bar{u} - u_{kr})$

### 3.3.4. Invloed van de waterdiepte op de ontgrondingstijd

Met relatie (3.13.) is vastgesteld, hoe stroom en bodemmateriaal de waarde van  $t_1$  beïnvloeden, anders gezegd: hoe de tijdschaal afhangt van de "snelheidschaal" en de "materiaalschaal". Nu blijft nog te bepalen op welke wijze de lengteschaal de tijdschaal beïnvloedt.

Indien van het materiaal dat uit de ontgrondingskuil getransporteerd wordt slechts een verwaarloosbaar gedeelte direct in suspensie gaat, geldt als continuïteitsvergelijking voor het bodemmateriaal

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.14.}$$



waarin  $T = \text{transport in m}^3/\text{s per m}'$ . Hieruit volgt voor de tijdschaal de relatie

$$n_t = n_h \cdot n_x / n_T \quad (3.15.)$$

welke met  $n_x = n_h$  (geen samentrekking) leidt tot

$$n_t \sim n_h^2 / n_T = \sqrt{n_h} \quad (3.16.)$$

Wordt daarentegen verondersteld, dat al het materiaal uit de ontgrondingskuil direkt in suspensie gaat, dan geldt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = f(T_{\text{lokaal}}) \quad (3.17.)$$

en

$$n_t \sim n_h \quad (3.18.)$$

Hiermee is de orde van grootte aangegeven die men voor de gezochte invloed van de lengte(=diepte)schaal op de tijdschaal kan verwachten. Op grond van het feit, dat de wervelactiviteit een belangrijke rol speelt bij het ontgrondingsproces, zou men geneigd zijn de voorkeur te geven aan relatie (3.18.). Uit de experimenten blijkt echter, dan relatie (3.16.) het best met de optredende verschijnselen overeenstemt.

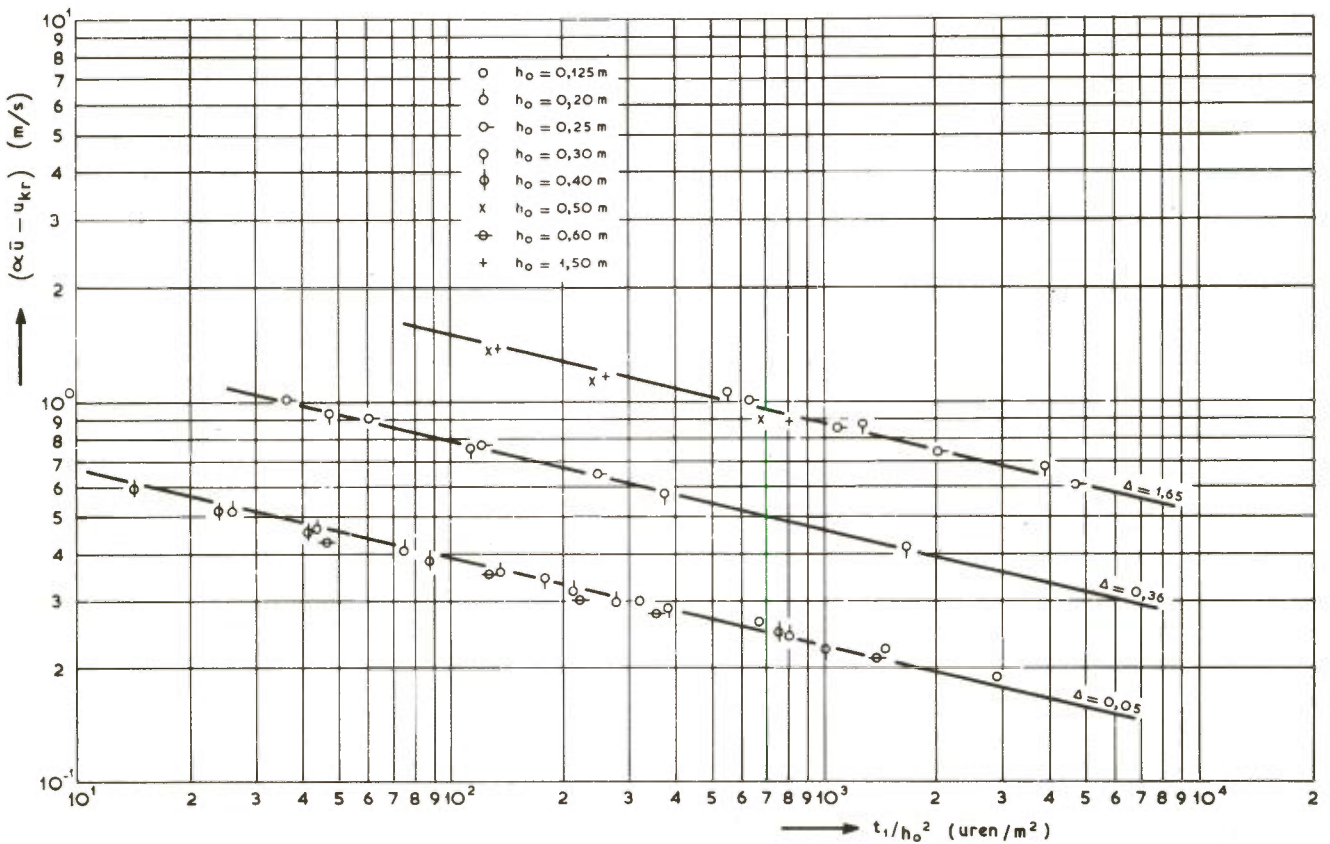
Als kenmerkende lengtemaat treedt in tweedimensionale situaties alleen de waterdiepte  $h_0$  op, daar de afmetingen in breedterichting willekeurig (in principe oneindig groot) zijn. Nagegaan is daarom, hoe de waarde van  $t_1$  verandert bij variërende waterdiepte. In een groot aantal gevallen is echter bij de inrichting van de schaalproeven de verhouding  $B/h_0$  van gootbreedte en waterdiepte bewust gelijk gehouden, om een zoveel mogelijk vergelijkbaar stroombeeld te verkrijgen. Indien in de te onderzoeken situatie een ruwe bodemverdediging al dan niet met drempel aanwezig was, werden bij vergelijkende proeven uiteraard ook de lengte en ruwheid van de verdediging en de drempelafmetingen in konstante verhoudingen met de waterdiepte gevarieerd.

Direkt vergelijkbare situaties zijn beproefd tot een onderlinge verhouding van maximaal 1 : 6 (series 19 t/m 22, bijlagen II-51a t/m 66a); de totale variatie van gebruikte waterdiepten strekte zich uit van 12,5 cm tot 1,50 m, dus met een verhouding van minimum tot maximum als 1 : 12. Over dit variatie-gebied werd met zeer goede benadering een kwadratische invloed van de waterdiepte op de ontgrondingstijd gevonden.

Relatie (3.13.). kan daarom dus als volgt worden uitgebreid:

$$t_1 = k \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\bar{a}u - u_{kr})^{-4,3} \quad (3.19.)$$

In figuur 22 is de geldigheid van dit verband ten aanzien van de invloed van de waterdiepte aangetoond door  $t_1/h_o^2$  te relateren aan  $(\bar{a}u - u_{kr})$ .



Figuur 22 Verband tussen  $t_1/h_o^2$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$

Met relatie (3.19.) zijn de invloeden van respectievelijk stroom, materiaal en waterdiepte op het tempo van het ontgrondingsproces vastgelegd en is bij gegeven waarden van  $\alpha$  vergelijkingsgrootheid  $t_1$  op een konstante faktor na bepaald. In de verhouding van twee  $t_1$ -waarden valt deze konstante weg, zodat uit (3.19.) de schaalregel volgt:

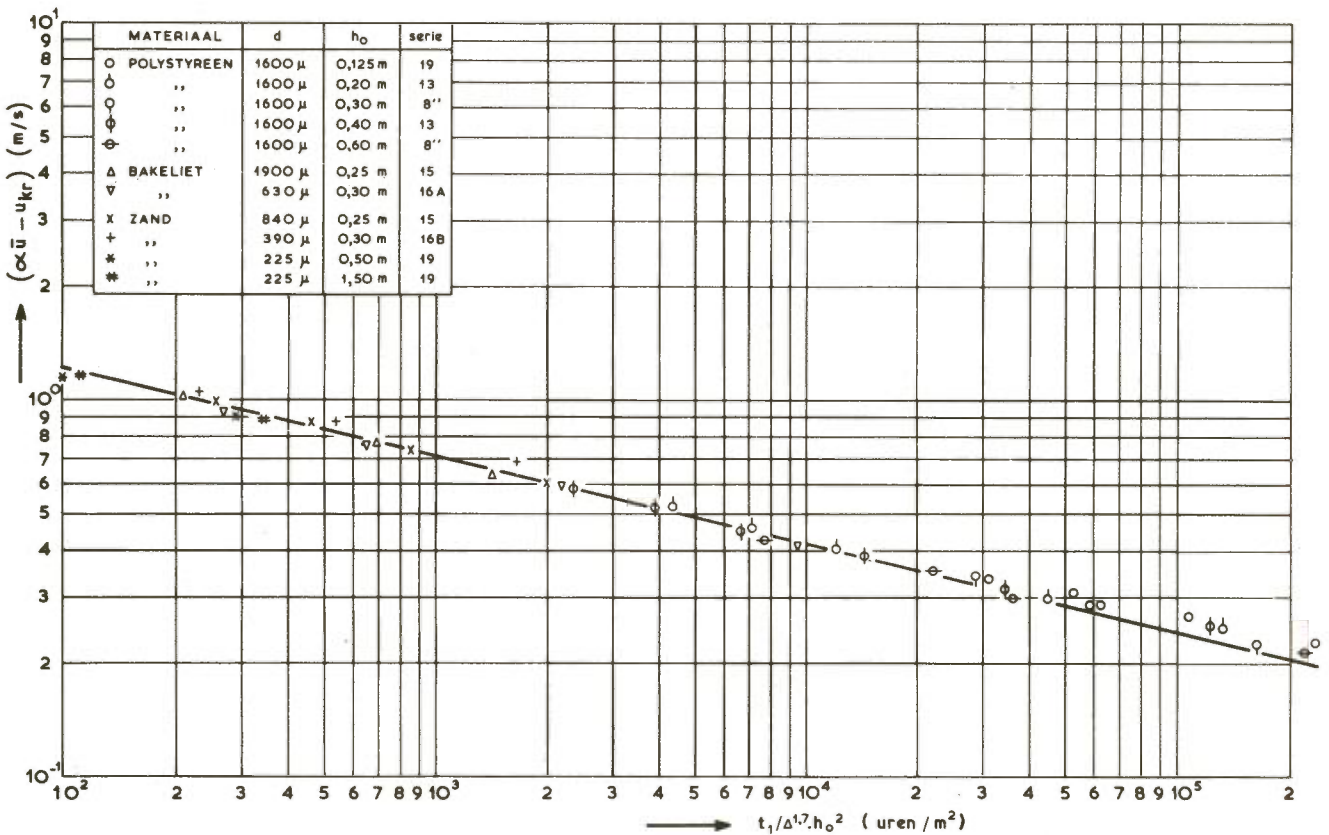
$$n_t = n_\Delta^{1,7} \cdot n_h^2 \cdot n_{(\bar{a}u - u_{kr})}^{-4,3} \quad (3.20.)$$

waarmee de gezochte betrekking tussen tijdschaal en overige schaalfactoren is geformuleerd.

De getalwaarde van de evenredigheidsconstante  $k$  is te bepalen door substitutie van de meetgegevens in (3.19.). Uit de uitgevoerde optimaliseringsberekening, waarin naast de belangrijkste series van het tweedimensionale onderzoek ook de uitkomsten van de driedimensionale ontgrondingsproeven werden betrokken, werd onder de voorwaarde "één geometrie - één  $\alpha$ " als beste waarde voor de constante  $k = 250$  gevonden. Dit optimum is overigens niet zeer geprononceerd, daar betrekkelijk grote variaties van  $k$  door aanpassing van  $\alpha$  blijken te kunnen worden gekompenseerd. De uitdrukking voor  $t_1$  kan nu worden gekompleteerd in de vorm:

$$t_1 = 250 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\alpha \bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (3.21.)$$

Relatie (3.21.) is in beeld gebracht in figuur 23; hiervoor zijn uit de grote hoeveelheid waarnemingsmateriaal dezelfde gevallen gekozen als op figuur 19 staan aangegeven.



Figuur 23 Verband tussen  $t_1 / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\alpha \bar{u} - u_{kr})$



### 3.3.5. Invloed van geometrie en aanstroomcondities

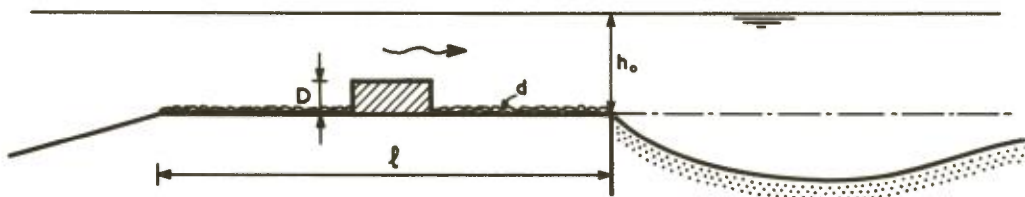
In 3.3.2. is toegelicht, waarom de invloed van de geometrie van het bovenstroomse stroombed op de grootte van  $t_1$  voor elk specifiek geval met behulp van een modelproef moet worden bepaald. Met het oog op de toepassing van het ontgrondingsonderzoek bij het ontwerpen van bodembeschermingen is het echter nuttig, inzicht te hebben in het kwalitatieve effect op het ontgrondingsproces van diverse alternatieve oplossingen. Daarom is aan het schaalonderzoek een aantal proevenseries toegevoegd, waarin de invloed van lengte en ruwheid van de bodemverdediging is nagegaan. Deze invloed kan worden uitgedrukt in de grootte  $\alpha$ , die immers (zie paragraaf 3.3.2. kenmerkend is voor de bovenstroomse geometrie, waarvan de geaardheid van de bodemverdediging een bepaald aspect vormt. Dit onderwerp is meer uitvoerig bestudeerd in het kader van het modelonderzoek M 847, waarbij het oog speciaal op deze problematiek was gericht. Voor gedetailleerde informatie wordt daarom naar de betreffende modelverslagen verwezen.

Om de invloed van de geometrie na te gaan, zijn met behulp van de in paragraaf 3.3.4. geformuleerde betrekking (3.21.) voor alle in bijlage 11-1 opgenomen proeven uit de gegeven waarden van  $\Delta$ ,  $h_0$ ,  $\bar{u}$  en  $u_{kr}$  en de daarbij gemeten grootte van  $t_1$  de bijbehorende getalwaarden van de coëfficiënt  $\alpha$  berekend. De uitkomsten, die in genoemde bijlage zijn opgenomen, laten zien dat  $\alpha$  per serie doorgaans redelijk konstant is, zodat deze grootte inderdaad als kenmerk van de geometrie kan worden beschouwd. Alleen bij serie 8 treedt een zodanige markante scheiding in twee groepen op, dat deze (oudste) serie in twee delen (series 8' en 8'' genoemd) moest worden gesplitst; vermoedelijk is een verschil in instroomcondities voor het verschil in  $\alpha$ -waarden verantwoordelijk geweest.

De berekende  $\alpha$ -waarden zijn per serie gemiddeld en deze gemiddelden zijn als karakteristiek voor de betreffende geometrieën aangehouden. Zij zijn dan ook gebruikt bij de samenstelling van de figuren 19 t/m 23 voor de berekening van de parameter  $(\bar{u} - u_{kr})$ . In figuur 24 is van deze getalwaarden van  $\alpha$  een overzicht gegeven, tezamen met de voornaamste geometrische kenmerken van de betreffende series (vergelijk ook figuur 14).

De invloed van de verdedigingslengte  $l$  is alleen bij gladde aanstroming systematisch onderzocht. De series 23, 24 en 25 laten het resultaat hiervan zien. Uit de tabel van figuur 24 blijkt dat toeneming van de verdedigingslengte van  $l = 2 h_0$  tot  $l = 14 h_0$  gepaard gaat met een duidelijke afname van  $\alpha$ , wat wegens relatie (3.21.) een toename van  $t_1$  betekent. De ontwikkeling van de ontgrondingskuil kan dus kennelijk worden vertraagd door een langere bodembescherming toe te passen, zolang men zich tenminste in het beschouwde variatiegebied beweegt. Het lijkt aannemelijk, dat deze

tendens bij voortgezette verlenging steeds flauwer zal worden.



serie	$D/h_0$	$d/h_0$	$l/h_0$	$\alpha$
8'	0	0	ca 9	2,18
8''	0	0	ca 9	1,85
11	0,33	0/0,03	ca 9	2,41
13	0,50	0/0,05	ca 9	2,73
14	0	0,07	ca 9	1,67
15	0	0,04	ca 9	1,63
16A	0,17	0,03	ca 9	1,73
16B	0,17	0/0,03	ca 9	1,89
17A	0,33	0,03	ca 9	2,09
17B	0,33	0/0,03	ca 9	2,28
19	0	0,03	12	1,53
20	0,23	0,03	12	1,83
21	0,33	0,03	12	2,01
22	0	0	12	1,97
23	0	0	2	2,44
24	0	0	8	1,91
25	0	0	14	1,77
26	0	0,003	14	1,69
27	0	0,006	14	1,63
28	0	0,01	14	1,58
29	0	0,02	14	1,52
30	0	0,04	14	1,51
31	0	0,08	14	1,54
37	0	0,12	14	1,64

Figuur 24 Invloed van de geometrie op  $\alpha$

In de series 25 t/m 31 en 37 is bij gelijkblijvende verdedigingslengte de ruwheid van de verdediging gevarieerd, oplopend van glad ( $d/h_0 \approx 0$ ) tot zeer ruw ( $d/h_0 = 0,12$ ). Uit deze proeven kan worden opgemaakt, dat  $\alpha$  aanvankelijk afneemt bij toenemende ruwheid, maar bij  $d/h_0 = 0,08$  weer een stijgende tendens begint te vertonen (zie tabel van figuur 24). Kennelijk is het zo, dat bij niet al te ruwe bodembeschermingen

de relatief sterke turbulentie-intensiteit niet geheel opweegt tegen de reductie van de bodemsnelheid. Een vol snelheidsprofiel, zoals optreedt bij gladde aanstroming, is dus ongunstiger dan de extra turbulentie, die door een ruwe bodem teweeg wordt gebracht, afgezien van het effect van uitzonderlijk grote ruwheden. Deze konklusie wordt ondersteund door de resultaten van de proevenseries 8' en 22, die eveneens bij een gladde bodem zijn uitgevoerd en voor situaties zonder drempel hoge  $\alpha$ -waarden te zien geven.

Behalve door de aard en de afmetingen van de bodembescherming wordt de ontgroning ook beïnvloed door vorm en hoogte van de drempelconstructie. Dit is af te leiden uit de meetresultaten van de onderling vergelijkbare series 15, 16A en 17A, respectievelijk 19, 20 en 21, terwijl ook de series 11 en 13 een indicatie hiervoor geven. Bij deze drie combinaties van series is de drempelhoogte  $D$  gevarieerd bij overigens (nagenoeg) gelijkblijvende kenmerken van de bodemverdediging (zie overzicht van figuur 24). De tendens, die uit de vermelde  $\alpha$ -waarden valt af te lezen, geeft een versterking van de ontgroning met toenemende drempelhoogte te zien. Bij hogere drempels wordt de waterbeweging sterker verstoord en de turbulentie heftiger; het wekt geen verbazing dat hiermee kennelijk, althans tot drempels met  $D = 0,5 h_0$ , een sneller verloop van het ontgrondingsproces gepaard gaat.

Naast de hier besproken invloeden op het tempo van de ontgroning, tot uitting komend in variërende  $\alpha$ -waarden, blijkt ook de aanzethelling van de kuil door de geometrie te worden beïnvloed. Dit punt wordt in de volgende paragraaf nader uitgewerkt.

### 3.3.6. Kuilvormen en aanzethellingen

Bij de analyse van de proevenseries 1 t/m 4, verricht om de gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen te toetsen (paragraaf 2.2.), werd behalve van waterdiepte, stroomsnelheid en bodemmateriaal ook van de geometrie geen invloed op de kuilvorm geconstateerd. In de loop van het verdere onderzoek bleek de in eerste instantie op dit punt vermeende onafhankelijkheid echter niet houdbaar, maar moest tot een zekere relatie tussen kuilvorm en geometrie worden besloten. Daarnaast traden soms meer incidentele afwijkingen in de kuilvorm op, die met bodemmateriaal of stroomsnelheid verband leken te houden. Ofschoon de gesignaleerde verschillen niet steeds een systematisch karakter vertoonden, waren ze in bepaalde gevallen toch opvallend genoeg om een nader onderzoek naar de vorm van de ontgrondingskuil te rechtvaardigen. Dit was niet alleen van belang in verband met de uitgangspunten van het gehele onderzoek, maar ook nood-

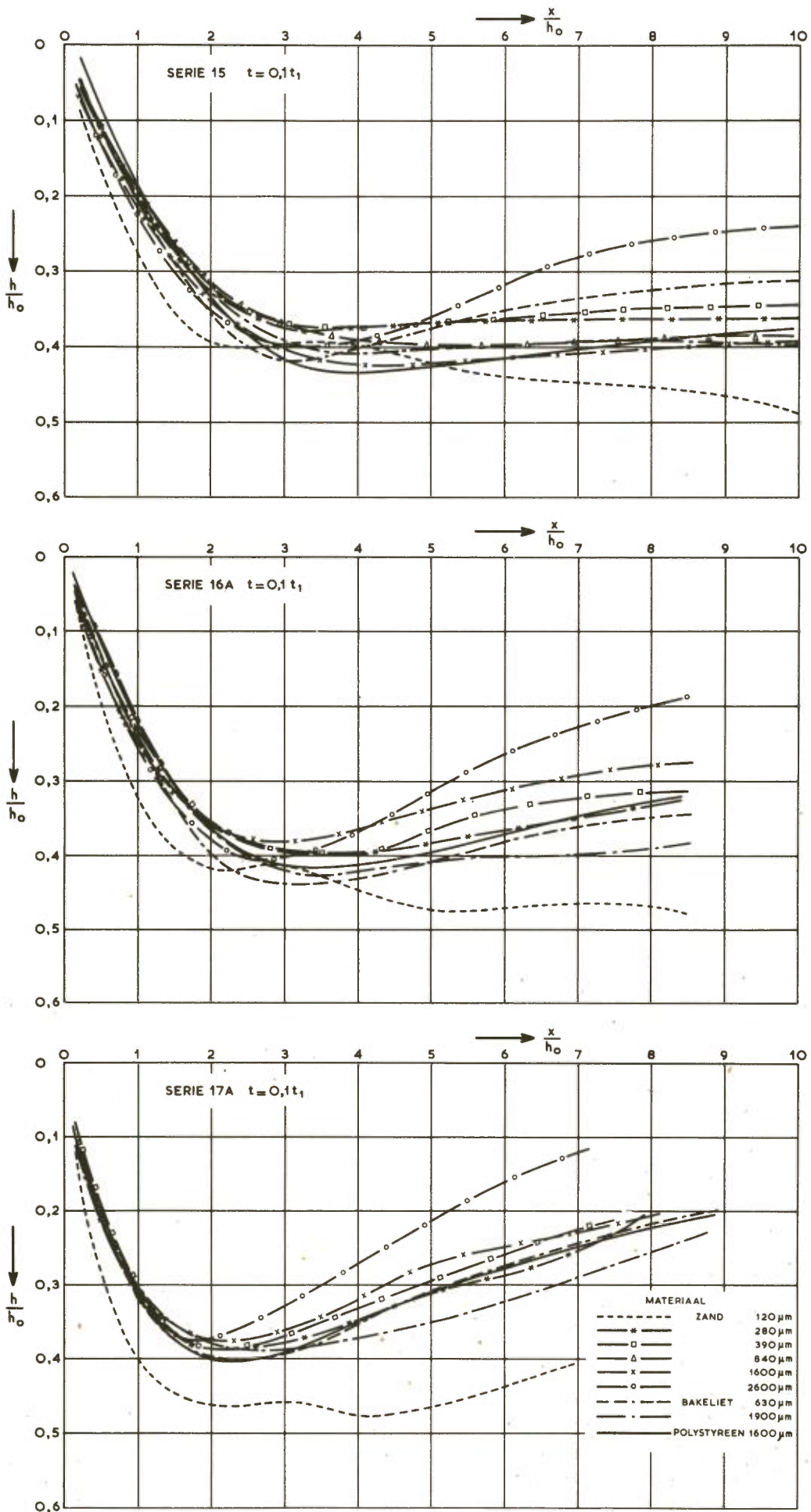


zakelijk met het oog op de bepaling van de aanzethelling  $\beta$ , die naast  $h_{\max}$  de voor de ontgroning meest kenmerkende parameter is (zie figuur 1).

Ten behoeve van dit nadere onderzoek van de kuilvorm is een zo compleet mogelijke inventarisatie gemaakt van de lengteprofielen van de ontgrondingskuilen, samengesteld uit de peilingen die tijdens de proeven zijn verricht. Uitgezet zijn de in de as van de goot gemeten en op afwijkingen in het dwarsprofiel gekorrigeerde ontgrondingsdiepten voor de tijdstippen  $t = 0,01 t_1$ ,  $0,035 t_1$ ,  $0,10 t_1$  en, voor zover aanwezig,  $0,15 t_1$ . De hiermee verkregen kuilprofielen zijn weergegeven op de bijlagen II-5b t/m 76b (de nummering korrespondeert met die van de bijlagen II-5a t/m 76a; van de proeven weergegeven op de bijlagen II-3a en 4a waren de profielgegevens niet meer te achterhalen. Uit deze beelden, die niet alleen de vorm van het kuilprofiel duidelijk laten herkennen maar ook een indruk geven van de ontwikkeling daarvan in de tijd, kon de invloed van de instelkondities op de karakteristiek van de kuilvorm en de steilheid van de aanzethelling worden gedestilleerd.

Wat bij beschouwing van genoemde bijlagen als eerste opvalt, is de grote mate van gelijkvormigheid van in het bijzonder de aanzet van de ontgrondingskuilen. Van enige systematische invloed van de stroomsnelheid is hier geen sprake, zodat in dit opzicht de resultaten van het vooronderzoek volkomen worden bevestigd. Duidelijk is voorts, dat het gedeelte van de kuil benedenstrooms van het diepste punt minder gelijkmatig is van vorm; de spreiding tussen de verschillende profielen is hier duidelijk groter. Toch is ook voor dit gedeelte van de ontgroning moeilijk een systematische invloed van de stroomsnelheid vast te stellen: ofschoon in een aantal gevallen de tendens te bespeuren valt, dat met toenemende snelheid een zekere verlenging van de uitschuring gepaard gaat, gaat deze regel niet konsekvent op. Over het geheel gezien kan daarom worden gesteld dat, binnen het gebied waarover de snelheden zijn gevarieerd, tussen kuilvorm en gemiddelde stroomsnelheid geen specifieke afhankelijkheid te konstateren valt.

Ten opzichte van het bodemmateriaal ligt de zaak iets genuanceerder. Wat het bovenstroomse kuilgedeelte aangaat, hierin is over het algemeen weer een grote gelijkvormigheid waar te nemen. Alleen de proeven met het fijnste zand ( $d = 120 \mu\text{m}$ ) vertonen een duidelijk afwijkend profiel. Deze uitzonderingspositie springt dadelijk in het oog op figuur 25, waarin respectievelijk voor de series 15, 16A en 17A de bij de verschillende materialen op het tijdstip  $t = 0,1 t_1$  gevonden lengteprofielen van de ontgrondingskuilen zijn vergeleken. Bij dit afwijkend gedrag van het fijne zand, dat ook in de tijd-ontgrondingsrelatie reeds opviel (zie paragraaf 3.3.1.), speelt het relatief grote suspensietransport vermoedelijk een rol. Een aanwijzing voor de mate waarin deze vorm van transport optreedt is de grootte van de verhouding  $u^*/w$ : bij grote waarden hiervan is een groot deel van het getransporteerde materiaal in suspensie, bij



Figuur 25 Kuilvormen bij diverse bodemmateriaalen

$u^*/w < 3 \text{ à } 4$  is het suspensietransport in een parallelstroom relatief onbelangrijk. Toepassing van dit criterium op de situatie in een ontgrondingskuil is niet goed doenlijk bij gebrek aan informatie over de in de bodemmeer optredende  $u'$ -waarden. Aannemen- de dat bij een bepaalde geometrie de betreffende  $u'$  evenredig met  $\bar{u}$  gesteld mag wor- den, kan wel worden vastgesteld dat, wat de verhouding  $u'/w \sim \bar{u}/w$  betreft, het zand - 120  $\mu\text{m}$  in de series 15, 16A en 17A een aparte plaats inneemt. Dit blijkt uit onderstaande tabel. Kennelijk moet ter verzekering van de gelijkvormigheid van de ontgrondingskuilen aan de verhouding  $\bar{u}/w$  of een vergelijkbare grootheid een bovengrens worden gesteld.

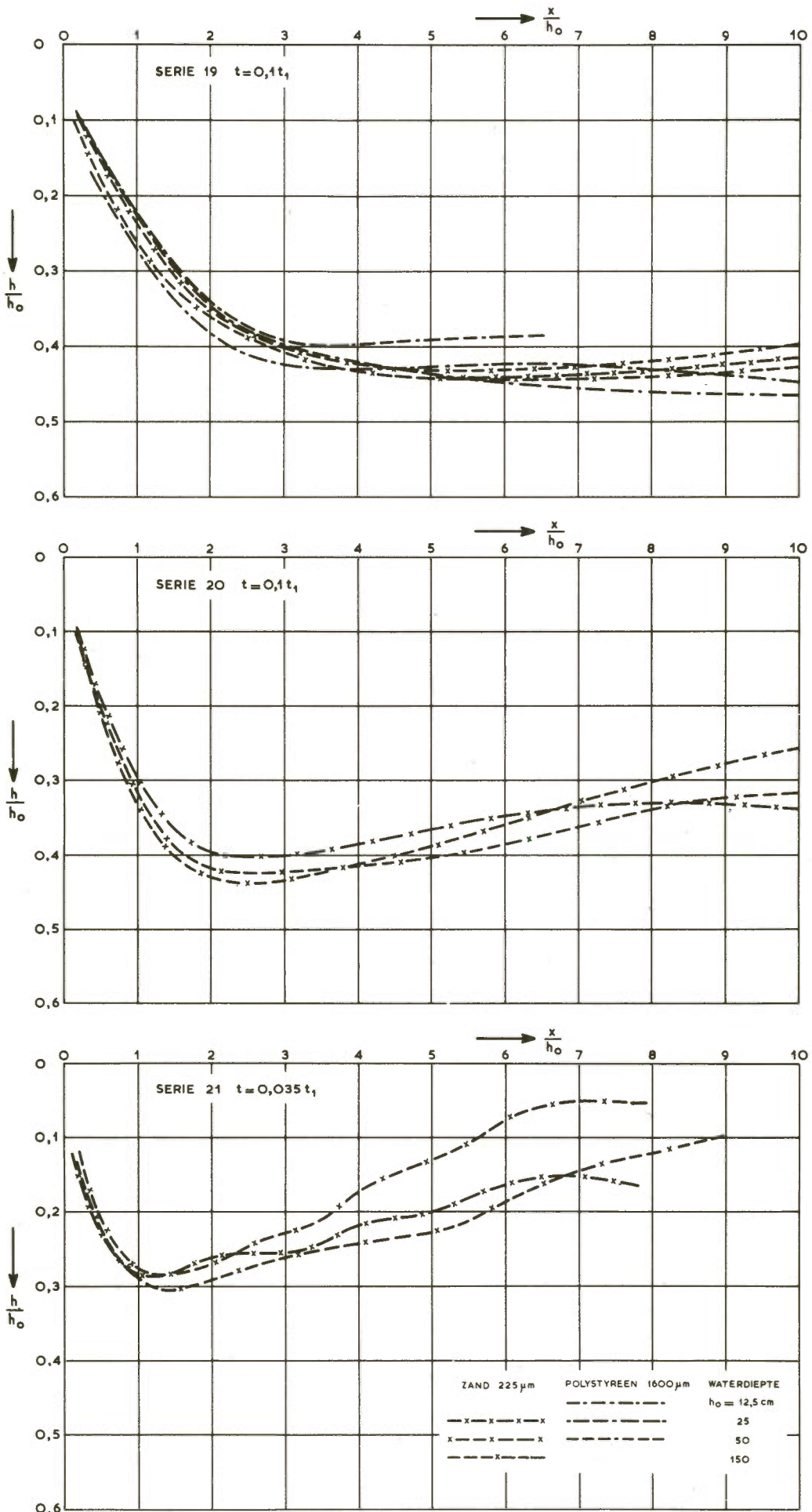
materiaal	d ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{u}$ (cm/s)		w (cm/s)	$\bar{u}/w$	
		min.	max.		min.	max.
zand	120	53,3	- 88	1,1	48,5	- 80
	280	63,3	- 88	3,6	17,6	- 24,5
	390	63,3	- 88	5,2	12,2	- 16,9
	840	64	- 88	11,1	5,8	- 7,9
	1600	63,3	- 88	18,0	3,5	- 4,9
	2600	63,3	- 88	23,5	2,7	- 3,7
bakeliet	630	33,3	- 64	2,5	13,3	- 25,6
	1900	43,3	- 80	6,8	6,4	- 11,8
polystyreen	1600	13,3	- 32	1,7	7,8	- 18,8

$$\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Benedenstrooms van het diepste punt is de overeenkomst in kuilprofiel ook redelijk goed, maar hier manifesteert zich eveneens een invloed van de valsnelheid van het bodemmateriaal. Voor de beide uitersten: zand-120  $\mu\text{m}$  ( $w = 1,1 \text{ cm/s}$ ) en zand-2600  $\mu\text{m}$  ( $w = 23,5 \text{ cm/s}$ ) is dit wel zeer duidelijk het geval, getuige het beeld van figuur 25. Maar ook voor de tusseliggende zandmengsels is, vooral bij de series 16A en 17A, de tendens waarneembaar, dat bij toenemende valsnelheid een kortere ontgrondingskuil ontstaat, doordat het opgenomen materiaal weer eerder tot bezinking komt. Ook de gelijkvormigheid van het benedenstroomse talud is dus wel aan beperkingen gebonden. Uit het oogpunt van toepassing van het ontgrondingsonderzoek is dit echter minder belangrijk, daar voor de vraag naar de grondmechanische stabiliteit van bodembescherming en afsluitkonstructie toch de vorm van de kuilaanzet doorslaggevend is.





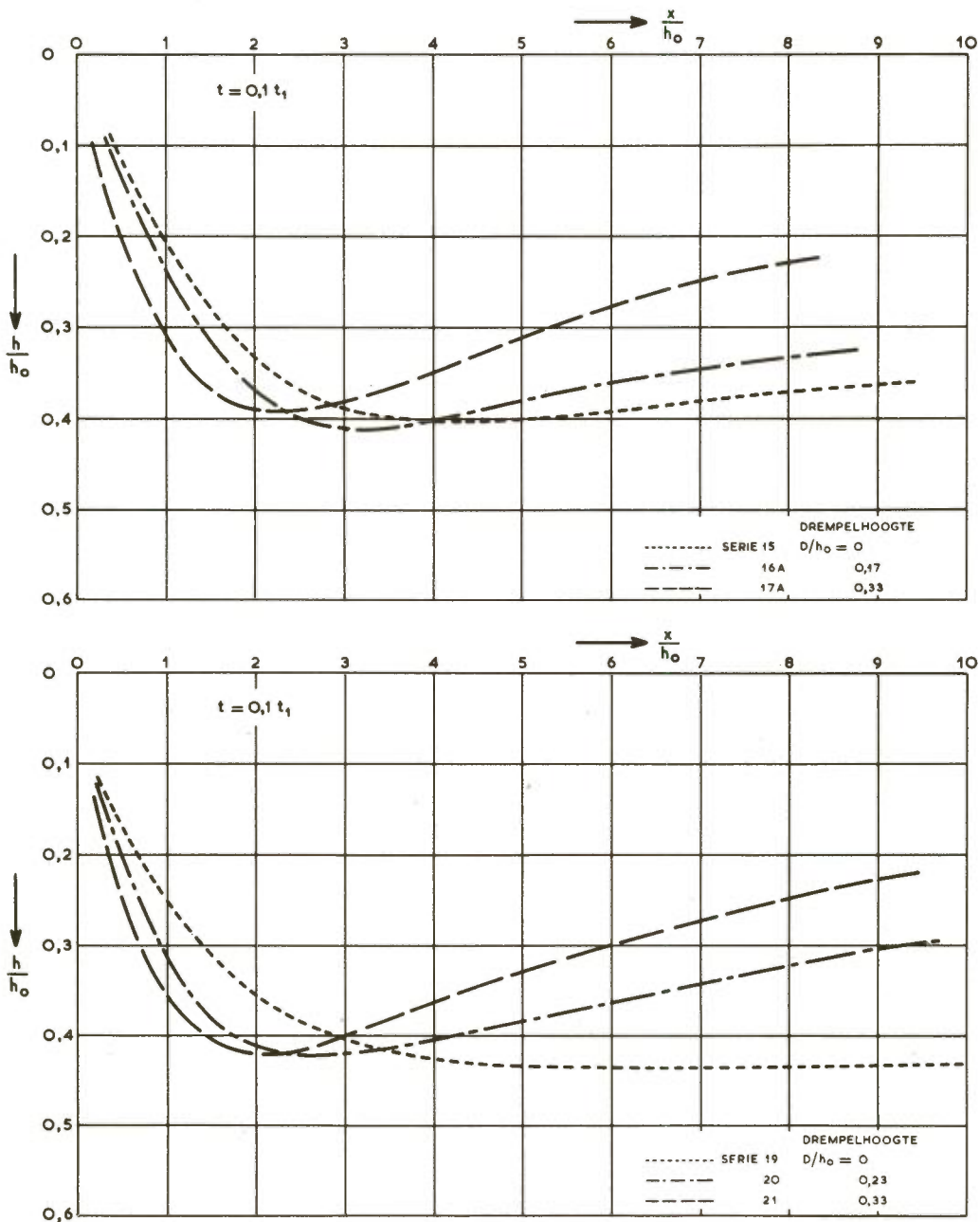
Figur 26 Kuilvormen bij diverse waterdiepten

Wat de invloed van de waterdiepte op de kuilvorm is, is af te lezen op figuur 26. Hierin zijn voor de series 19 en 20 de kuilprofielen op  $t = 0,1 t_1$  en voor serie 21 op  $t = 0,035 t_1$  afgebeeld, optredend bij de proeven met respectievelijk  $h_0 = 0,25$  m,  $0,50$  m en  $1,50$  m uitgevoerd met duinzand ( $d = 225 \mu\text{m}$ ). Bij serie 19 zijn bovendien nog de resultaten van de polystyreen-proeven toegevoegd, waarbij waterdiepten zijn toegepast van  $0,125$  m,  $0,25$  m en  $0,50$  m. De konklusie uit deze vergelijking van ontgrondingsprofielen kan niet anders zijn, dan dat door genoemde proeven de aanvankelijk gevonden gelijkvormigheid bij verschillende lengteschalen volledig wordt bevestigd; de spreiding die nog gevonden wordt, is voor de interpretatie van het ontgrondingsonderzoek irrelevant. Ook door de resultaten van de series 11, 13 en 14 (zie de bijlagen II-11b t/m 16 b) wordt deze konklusie ondersteund.

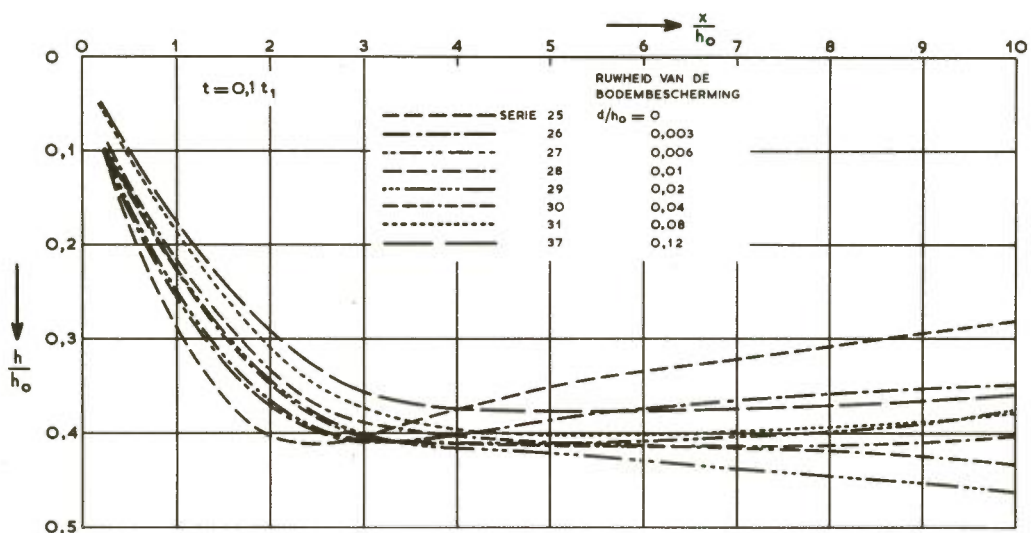
Blijft tenslotte nog over de afhankelijkheid van de kuilvorm van de bovenstroomse geometrie van het stroombed. In figuur 26 treedt deze afhankelijkheid reeds duidelijk naar voren voor zover het de invloed van de drempelhoogte betreft, wanneer men de profielen van de verschillende series onderling vergelijkt. Dezelfde tendens als hier optreedt valt te signaleren bij vergelijking van de profielen van de series 15, 16A en 17A op figuur 25. Deze tendens, in figuur 27 voor beide groepen nog wat gestyleerder afgebeeld, houdt in dat bij hogere drempels (waarmee gepaard gaat een sterkere turbulentie-intensiteit) een meer geprononceerde, kortere en puntiger ontgrondingskuil wordt waargenomen dan bij lagere drempels, terwijl ook de aanzethelling steiler is. Situaties met relatief hoge drempels geven dus ontgrondingskuilen met een ten aanzien van de grondmechanische stabiliteit ongunstige vorm. Daar bovendien het tempo van het ontgrondingsproces met de drempelhoogte toeneemt (zie paragraaf 3.3.5.), is het in twee opzichten raadzaam de duur van genoemde situaties in de praktijk zoveel mogelijk te beperken.

Evenzeer ongunstig, zowel wat ontgrondingssnelheid als kuilvorm betreft, blijken toestanden met gladde bodembescherming te zijn. In figuur 28 zijn de kuilvormen weergegeven ( $t = 0,1 t_1$ ) voor de series 25 t/m 31 en 37, waarbij de ruwheid van de bodembescherming systematisch is vergroot. Duidelijk is te zien, dat met toeneming van de ruwheid een grondmechanisch gezien gunstiger kuilprofiel ontstaat.

Ten aanzien van de aanzethelling  $\cotg \beta$  zijn uit het voorgaande de volgende konklusies te trekken. Stroomsnelheid, bodemmateriaal en waterdiepte (lengteschaal) hebben binnen het onderzochte variatiegebied geen of een te verwaarlozen invloed op de steilheid van de aanzethelling, daar in het bijzonder het kuilgedeelte bovenstrooms van het diepste punt bij variatie van genoemde grootheden een opvallende gelijkvormigheid bezit. Uit het afwijkende gedrag van het zand- $120 \mu\text{m}$  volgt echter, dat deze onafhankelijkheid van de aanzethelling niet onbegrensd is, maar vermoedelijk aan een (nog niet vastgestelde) maximale waarde van de verhouding  $\bar{u}/w$  of een vergelijkbare parameter is gebonden. Overschrijding van deze grens lijkt tot steilere aan-



Figuur 27 Kuilvormen bij diverse drempelhoogten



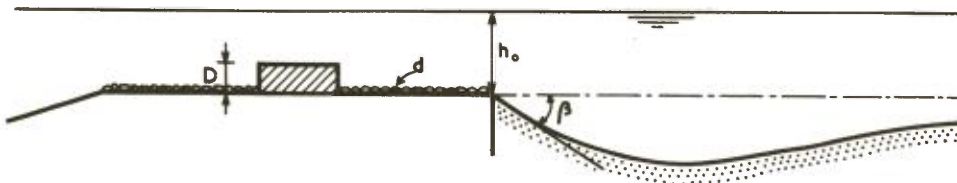
Figuur 28 Kuilvormen bij diverse ruwheden van de bodembescherming



zethellingen aanleiding te geven.

Niet te negeren is voorts de invloed van de geometrie op de grootte van  $\cotg \beta$ : zowel bij hoge drempels als bij gladde verdedigingen worden steilere aanzethellingen gevonden dan bij respectievelijk lage drempels en ruwe verdedigingen. Voor de gelijkheid van  $\cotg \beta$  in model en prototype is het dus van belang, evenals dat ten aanzien van de koëfficiënt  $\alpha$  gold, dat aan de geometrische gelijkvormigheid van bodembescherming en drempelconstructie voldoende aandacht wordt besteed.

Wat de tijdsafhankelijkheid van de aanzethelling betreft, kan uit de proeven worden gekonkludeerd, dat deze van beperkte duur is. Nadat de aanzet van de kuil is gevormd, wordt in betrekkelijk korte tijd een evenwichtshelling bereikt. Uit een nadere beschouwing van een groot aantal van de in de bijlagen II-5b t/m 76b gegeven profielen werd vastgesteld, dat tussen de tijdstippen  $t = 0,10 t_1$  en  $t = 0,15 t_1$  geen noemenswaardige veranderingen in  $\cotg \beta$ -waarden meer optraden. De gemeten waarden bij  $t = 0,1 t_1$  zijn daarom als evenwichtshellingen aangehouden. Zij staan in bijlage II-1 voor de onderzochte situaties aangegeven (waarbij van specificatie naar stroomsnelheid is afgezien). In de tabellen van figuur 29 zijn de uitkomsten van de in dit verband belangrijkste series samengevat. De getalwaarde van  $\cotg \beta$  correspondeert daarbij met  $x$ , wanneer men de steilheid van de aanzethelling uitdrukt in de vorm  $1 : x$ ; een lagere waarde geeft dus een steilere helling aan.



serie	$h_0$	$\frac{D}{h_0}$	$\cotg \beta$ op $t = 0,1 t_1$								
			zand						bakeliet		polystyreen
			120 $\mu\text{m}$	280 $\mu\text{m}$	390 $\mu\text{m}$	840 $\mu\text{m}$	1600 $\mu\text{m}$	2600 $\mu\text{m}$	630 $\mu\text{m}$	1900 $\mu\text{m}$	1600 $\mu\text{m}$
15	0,25m	0,00	4,3	5,8	5,8	5,5	5,2	5,0	5,4	5,4	5,4
16A	"	0,17	2,8	4,8	4,9		4,1	4,4	4,5	4,5	4,6
16B	"	"		4,5	4,5	4,3	4,3				
17A	"	0,33	2,0	3,0	3,3		3,3		3,8	3,8	3,5
17B	"	"		3,2	3,3	3,5	3,3				3,2

serie	$h_0$	$\frac{D}{h_0}$	$\cotg \beta$ op $t = 0,1 t_1$
			zand-225 $\mu\text{m}$
19	0,25m	0,00	4,9
	0,50	"	4,9
	1,50	"	4,9
20	0,25	0,23	3,7
	0,50	"	3,7
	1,50	"	3,7
21	0,25	0,33	3,6
	0,50	"	3,0
	1,50	"	-

serie	$h_0$	$\frac{D}{h_0}$	$\cotg \beta$ op $t = 0,1 t_1$
			polyst.-1600 $\mu\text{m}$
25	0,25m	0	4,1
26	"	0,003	5,5
27	"	0,006	5,6
28	"	0,01	5,9
29	"	0,02	6,1
30	"	0,04	6,1
31	"	0,08	6,7
37	"	0,12	6,7

Figuur 29. Aanzethellingen bij diverse materialen, waterdiepten en geometrieën.

#### 4. Driedimensionaal onderzoek (M 863)

##### 4.1. Inrichting en uitvoering van de proeven

Doordat in de natuur dikwijls situaties worden aangetroffen waarin het stroombeeld met goede benadering als tweedimensionaal kan worden beschouwd, zijn de in het voorgaande beschreven onderzoekresultaten in een groot aantal praktijkgevallen direct toepasbaar. Dit toepassingsgebied vindt echter zijn grens op die plaatsen waar zijdelingse effecten optreden in de vorm van dwarsstromen en horizontale snelheidsgradiënten, vaak gepaard gaande met wervelstraten; in het algemeen dus in de nabijheid van de oevers en ter plaatse van onregelmatigheden in het dwarsprofiel. In die gevallen heeft men te maken met een uitgesproken driedimensionaal stroombeeld, en de vraag rijst, in hoeverre de boven afgeleide wetmatigheden hier nog hun geldigheid behouden. Deze vraag klemt te meer, daar de driedimensionale situaties vaak maatgevend blijken te zijn voor het gehele dwarsprofiel: enerzijds is de ontgronding er verhoudingsgewijs intensief wegens de relatief sterke turbulentie (bekend is het zogenaamde "kopeffect" van dwars op de stroom staande konstrukties), anderzijds is juist in de nabijheid van de oever of van genoemde konstrukties het gevaar van stabiliteitsverlies van de ondergrond groter dan meer naar het midden van de stroom. Het is dus van groot belang ook deze situaties in een model te kunnen onderzoeken. De opzet van het systematische ontgrondingsonderzoek: schaalregels te formuleren voor het toegepaste ontgrondingsonderzoek, komt dus pas volledig tot zijn recht, wanneer hierin behalve tweedimensionale situaties ook driedimensionale gevallen worden betrokken. Bij deze uitbreiding van het onderzoekveld kan uiteraard worden geprofiteerd van en voortgebouwd op hetgeen reeds eerder aan inzichten en technieken is ontwikkeld.

De vraagstelling bij het driedimensionale onderzoek is geheel dezelfde als die bij het tweedimensionale: hoe verloopt het ontgrondingsproces met de tijd, en hoe wordt de tijdschaal beïnvloed door de lengteschaal, de "materiaalschaal" en de snelheidsschaal? Het verschil tussen beide onderzoeken ligt uitsluitend in het stroombeeld, dat in het driedimensionale geval wordt gekenmerkt door een ongelijkmatige horizontale snelheidsverdeling, bepaald door de driedimensionale geometrie van het stroombed. Gezien de sterke afhankelijkheid van de stroomsnelheid die bij het tweedimensionale onderzoek voor de ontgronding is gevonden, mag een duidelijke relatie worden verwacht tussen de vorm van de horizontale snelheidsverdeling en het teweeggebrachte ontgrondingsbeeld. Bij het driedimensionale schaalonderzoek moet daarom de eis



worden gesteld, dat de horizontale stroomverdeling bij gelijke geometrische situaties van gelijke vorm is, onafhankelijk van de overige instelcondities.

Bij het driedimensionale onderzoek wordt men, sterker nog dan bij het tweedimensionale, gekonfronteerd met de vrijwel onbeperkte variatiemogelijkheden in de geometrische vormgeving van het stroombed. Gezien de onmogelijkheid in dit opzicht naar volledigheid te streven en gezien ook de nutteloosheid daarvan wegens het feit, dat de specifieke invloed op de ontgronding van een bepaalde geometrie niet rechtstreeks uit vorm en verhoudingen daarvan is af te leiden, maar alleen experimenteel kan worden bepaald (zie paragraaf 3.3.2;), is het aantal varianten bij het onderzoek M 863 bewust beperkt en van een oorspronkelijk uitgebreider skala uiteindelijk teruggebracht tot niet meer dan drie.

Afgezien is van allerlei verschillende vormen van het typische driedimensionale element in de geometrie; hiervoor is de meest extreme vorm gekozen die denkbaar is, namelijk een scherp, vertikaal beëindigd schot dwars op de stroomrichting, eenzijdig aangebracht. De breedte van dit schot is steeds gelijk gehouden aan een tiende van de totale gootbreedte. Voor het overige is het stroombed uitgevoerd als een rechte goot met rechthoekig dwarsprofiel; de verhouding tussen gootbreedte en waterdiepte is niet gevarieerd en in alle gevallen aangehouden op 20 : 1. Ook lengte en ruwheid van de bodemverdediging, die over gelijke lengten boven- en benedenstrooms van het verticale schot zijn aangebracht, zijn niet gevarieerd. De enige variatie in de geometrie die is toegepast betreft de op de verdediging aangebrachte drempel: deze was of niet aanwezig, of wel aanwezig met over de gehele lengte een gelijke hoogte van respectievelijk 0,3 dan wel 0,6 maal de waterdiepte. In figuur 30 is de situatie schematisch afgebeeld, terwijl in bijlage III-2 de toegepaste geometrische verhoudingen meer gedetailleerd staan aangegeven.

Zoals eveneens uit figuur 30 is op te maken, is het onderzoek uitgevoerd in drie goten van respectievelijk 10 m, 5 m en 2,5 m breed. Hiermee konden dus ontgrondingsproeven worden gedaan met onderlinge lengteschalen van 1 : 2 en 1 : 4. Hoewel deze schaalvariatie betrekkelijk beperkt is, stuitte verdere uitbreiding op zondanige bezwaren dat deze beperking moest worden geaksepteerd. Bij verdere verkleining waren dit bezwaren van modeltechnische aard (te geringe marge tussen de stroomsnelheden waarbij respectievelijk begin van materiaaltransport en schietend water optreden), bij verdere vergroting bezwaren van financiële aard (zeer grote modelafmetingen, zeer grote debieten, zeer langdurige proeven, met alle consequenties vandien).

In de genoemde drie goten zijn bij de drie toegepaste geometrieën ontgrondingsproeven gedaan onder uiteenlopende condities van stroomsnelheid en bodemmateriaal. In totaal zijn 110 situaties onderzocht. Als bodemmateriaal zijn gebruikt duinzand, grof bakeliet en polystyreen in twee fijnheden. De proeven met zand en bakeliet zijn



uitgevoerd in het Laboratorium De Voorst, die met polystyreen in het Laboratorium Delft. De korrelverdelingen van de gebruikte materialen zijn weergegeven in bijlage III-2. Bij zand en bakeliet trad nog wel eens variatie in de verdeling op en is daarom bij elke proef opnieuw een monster genomen en de zeefkromme bepaald; in de bijlage is het variatiegebied zo goed mogelijk door de twee uitersten afgebakend. Bij de twee polystyreensoorten was de gradering zo gering, dat hiervoor bij alle proeven dezelfde korrelafmetingen van respectievelijk 1600  $\mu\text{m}$  en 2400  $\mu\text{m}$  konden worden aangehouden.

Evenals bij het tweedimensionale onderzoek werd bij elke combinatie van goot (= lengteschaal), bodemmateriaal en geometrie een aantal proeven gestroomd met verschillende debieten, teneinde de invloed van de stroomsnelheid op het driedimensionale ontgrondingsproces na te gaan. Bij de proeven in het Laboratorium De Voorst werden de debieten ingesteld met behulp van maximaal vier automatische romijnstuwen; bij de geringe debieten die voor de kleinste goot ( $B = 2,50 \text{ m}$ ,  $h_0 = 12,5 \text{ cm}$ ) vereist waren, bleek deze regeling echter te grof en werd een speciale voorziening getroffen met inschakeling van een V-stuw. In het Laboratorium Delft werd het ingestelde debiet bepaald uit het drukverschil tussen binnen- en buitenzijde van een bochtstuk in het leidingsysteem, nadat dit tevoren aan de hand van debietmetingen met mikromolens was geijkt. De in te stellen waterstanden werden door middel van kleppen aan de benedenstroomse zijde geregeld en met een peilnaald op hun juiste waarde gecontroleerd.

Aanvankelijk werden de te meten ontgrondingen met de hand gepeild. Deze methode bleek echter voor het omvangrijke meetprogramma zo arbeidsintensief en tijdrovend, dat het verantwoord werd geoordeeld over te gaan tot de aanschaf van automatische meetapparatuur. Op beide modellen, in Delft en in De Voorst, werd een echolood geïnstalleerd, dat langs een verrijdbare meetwagen heen en weer bewogen kon worden boven de ontgrondingsbak benedenstrooms van de bodemverdediging. Met de echoloodinstallatie was een printapparaat verbonden, dat de gevonden diepten registreerde. Gemeten werd in vaste raaien dwars op de goot op afstanden, gerekend vanaf het benedenstroomse einde van de verdediging, van 0,4, 0,8, 1,2, 1,6, 2,4, 3,2, 4,0, 5,2, 6,4, 8, 10, 12, 14 en 16 maal de waterdiepte  $h_0$ . In elke dwarsraai werden 19 punten opgenomen op onderlinge afstanden gelijk aan  $h_0$ . Op de bijlagen III-3b t/m 26b is dit net van meetpunten aangegeven; het is konsekwent voor alle proeven aangehouden, terwijl de maasafstanden steeds in verhouding zijn gebracht tot de afmetingen van de goot.

Bij het merendeel van de ontgrondingsproeven zijn, tussen de peilingen door of direkt na afloop van de proef, snelheidsvertikalen gemeten in de raai korrespon-

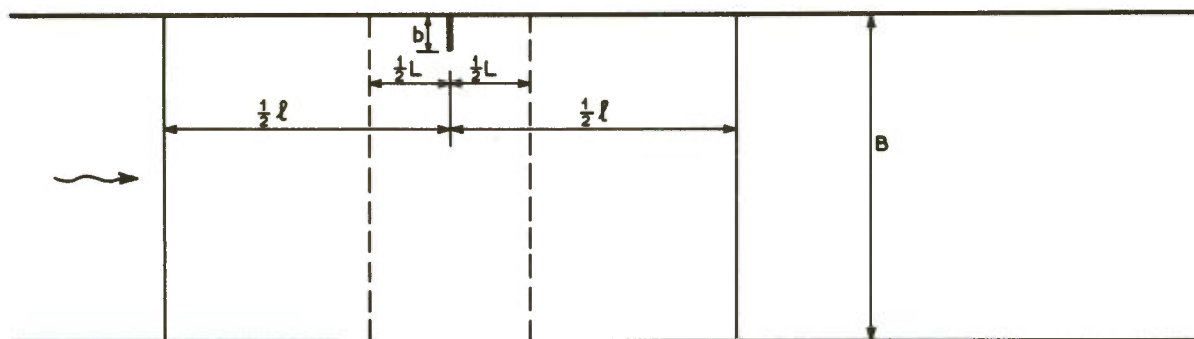
derend met de benedenstroomse rand van de bodemverdediging. De plaats van de vertikalen in de raai is niet steeds gelijk, maar afhankelijk van het waargenomen stroombeeld zo goed mogelijk gekozen. De snelheidsmetingen zijn uitgevoerd met een mikromolen. Behalve de gemiddelde waarden  $\bar{u}$  werden ook de standaardafwijkingen  $u'$  als maat voor de turbulentie-intensiteit bepaald,  $\bar{u}$  met behulp van een elektronische teller en de ijkgrafiek van de molen,  $u'$  met behulp van elektronische kwadratoren en integratoren. Uit de gemeten waarden kon de gemiddelde stroomsnelheid in een vertikaal worden berekend; door samenstelling van de diverse vertikaalgegevens werd voor elke proef een beeld verkregen van de horizontale snelheidsverdeling.

#### 4.2. Overzicht van de verrichte proeven

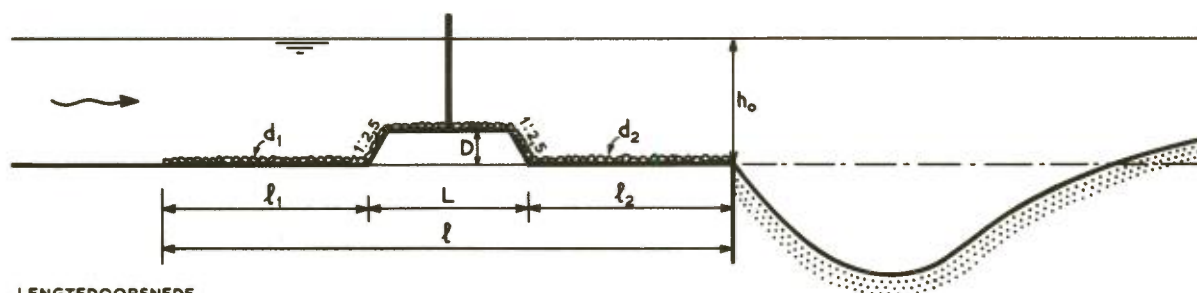
In bijlage III-1 zijn alle proeven, die in het kader van het driedimensionale onderzoek zijn uitgevoerd, gerangschikt op overeenkomstige wijze als dat in bijlage II-1 voor het tweedimensionale onderzoek is gedaan. Een samenvattend overzicht van de onderzochte situaties is gegeven in figuur 30.

Wegens het beperkte aantal geometrieën valt bij het driedimensionale ontgrondingsonderzoek de nadruk op de invloeden van schaal en bodemmateriaal. Wel zijn echter steeds bij elke ingestelde situatie van schaal en materiaal alle drie geometrieën onderzocht. Door de rangschikking van de proeven naar geometrie resulteren zodoende drie grote series van proeven van gelijkwaardige samenstelling.

De codering van de proeven is zodanig opgezet, dat hierin de diverse kenmerken van schaal, geometrie en stroom direkt tot uitdrukking komen. De kodes bestaan uit afwisselend letters en cijfers, die achtereenvolgens betrekking hebben op: gootafmetingen (B, D of F), drempelhoogte (0, 1 of 2), vorm dwarschot (V), verdedigingslengte (2), verdedigingsruwheid (M) en stroomsnelheid (getal = aantal cm/s). Zie voor de exakte betekenis van de gebruikte tekens bijlage III-2. Doordat aanvankelijk een grotere variatie van de geometrische grootheden werd voorzien dan uiteindelijk is doorgevoerd, is de codering achteraf gezien wat gekompliceerder dan strikt noodzakelijk zou zijn. Zo hadden de aanduidingen voor de vorm van het dwarschot en voor lengte en ruwheid van de verdediging in feite achterwege kunnen blijven, daar deze kenmerken bij alle proeven gelijk zijn. Voorts zijn de in het oorspronkelijke programma opgenomen goottypen A, C en E vervallen; deze hadden betrekking op het onderzoek naar de invloed van de samentrekking op de ontgroning, waarvan bij nader inzien is afgezien zoals reeds in de inleiding is vermeld.



BOVENAANZICHT



LENGTEDOORSNEDE

Serie	$\frac{b}{B}$	$\frac{D}{h_o}$	$\frac{L}{h_o}$	$\frac{d_{1,2}}{h_o}$	$\frac{l_{1,2}}{h_o}$	$\frac{l}{h_o}$	B (m)	$h_o$ (m)	aantal proeven		
									zand	bakeliet	polystyreen
.. 0V2M	0,1	0	-	0,02	-	24	10	0,50	5		
							5	0,25	5	4	6
							2,5	0,125	4	5	9
.. 1V2M	0,1	0,3	4	0,02	10	24	10	0,50	5		
							5	0,25	5	4	5
							2,5	0,125	4	4	9
.. 2V2M	0,1	0,6	4	0,02	10	24	10	0,50	6		
							5	0,25	4	6	4
							2,5	0,125	4	5	7

Figuur 30. Overzicht van de onderzochte situaties (M 863).



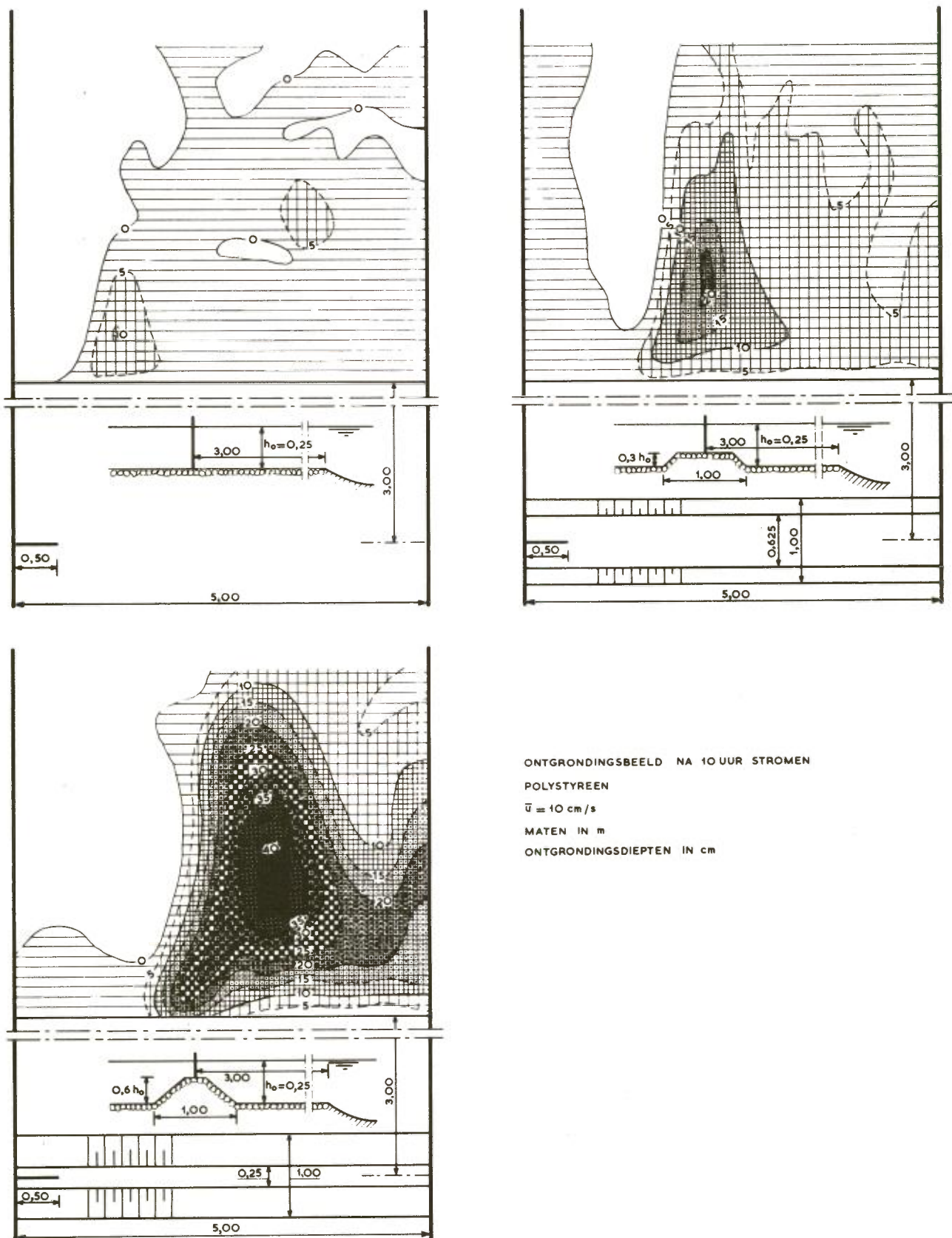
Voorafgaand aan het eigenlijke ontgrondingsonderzoek is een aantal proeven met vaste bodem uitgevoerd, teneinde een beter inzicht te verkrijgen in de invloed, die de ontgrondingskuil uitoefent op de stroomverdeling aan het einde van de bodemverdediging. Een overzicht van deze proeven is gegeven in paragraaf 4.3.2., waarin ook de resultaten ervan worden besproken.

### 4.3. Resultaten van het onderzoek

#### 4.3.1. Algemeen beeld van het ontgrondingspatroon

Het ontgrondingsbeeld, dat bij de toegepaste geometrieën optrad, zag er in principe als volgt uit: aan de zijde van het verticale schot een geprononceerde kuil, naar de oever begrensd door een steil oplopende rug en naar het midden overgaand in verhoudingsgewijs flauwere uitschuringen van een type als gevonden bij het tweedimensionale onderzoek. Het ontstaan van de markante ontgrondingskuil benedenstrooms van het schot hield duidelijk verband met de sterk eroderende werking van de door het schot opgewekte wervelstraat. De plaats van deze wervelstraatkuil varieerde met de geometrie: naarmate de drempelhoogte toenam, verschoof hij meer naar het midden van de goot. Dit algemene ontgrondingspatroon is in figuur 31 met een voorbeeld geïllustreerd. Uit deze figuur valt ook reeds op te maken, dat het ontgrondingsproces bij hogere drempels sneller verloopt dan bij lagere, hetgeen overeenstemt met de resultaten van het tweedimensionale onderzoek.

Het door de wervelstraat in beweging gebrachte materiaal werd ten dele met de hoofdstroom meegenomen, ten dele zijdelings afgevoerd naar de zich achter het schot bevindende neer, waar het, onttrokken aan de invloed van wervelstraat en hoofdstroom, snel tot bezinking kwam. Als gevolg hiervan trad op deze plaats aanzanding op en ontstond in de luwte van het schot de eerder genoemde rug. Door de relatief te kleine transportcapaciteit van de neer kwam het voor dat deze aanzanding buiten proportie werd weergegeven, hetgeen van invloed zou kunnen zijn op de vorming van de aangrenzende wervelstraatkuil. Uit een vergelijking van twee ontgrondingsproeven met gelijke instelcondities, waarbij bij een van beide het naast de kuil opgehoopte materiaal tijdens het ontgrondingsproces regelmatig werd verwijderd, kon echter worden vastgesteld dat van een aanwijsbaar effect op het ontgrondingsbeeld geen sprake was.



Figuur 31. Algemeen beeld van het driedimensionale ontgrondingspatroon.

#### 4.3.2. Invloed van de ontgrondingskuil op de stroomverdeling

Bij de beschouwing van de meetresultaten van de eerste serie ontgrondingsproeven, uitgevoerd in de D-goot ( $B = 5 \text{ m}$ ,  $h_o = 0,25 \text{ m}$ ), viel op, dat de horizontale snelheidsverdeling aan het einde van de bodemverdediging bij eenzelfde geometrische situatie soms vrij sterke verschillen vertoonde. Gezien de eis van gelijke stroomverdeling bij gelijke geometrie, terwille van de onderlinge vergelijkbaarheid van de schaalproeven gesteld, was een nader onderzoek naar de oorzaak van deze verschillen noodzakelijk.

De stroomsnelheidsmetingen werden verricht bij een reeds gevormde ontgrondingskuil, zodat beïnvloeding van de stroomverdeling door de ontgrondingskuil voor de hand lag. Daarnaast werd echter een invloed van het debiet (dus van de gemiddelde snelheid) op de verdeling niet uitgesloten geacht. Om hierover zekerheid te verkrijgen is in de D-goot een serie proeven gedaan, waarbij ten eerste bij een vastgelegde horizontale bodem de stroomverdeling is gemeten bij verschillende debieten, ten tweede bij gelijke debieten de stroomverdelingen zijn vergeleken bij een vastgelegde horizontale bodem en een vastgelegde ontgrondingskuil ( $h_{\max} \approx h_o = 0,25 \text{ m}$ ). De serie bestond uit de volgende proeven:

a) proeven met vastgelegde horizontale bodem

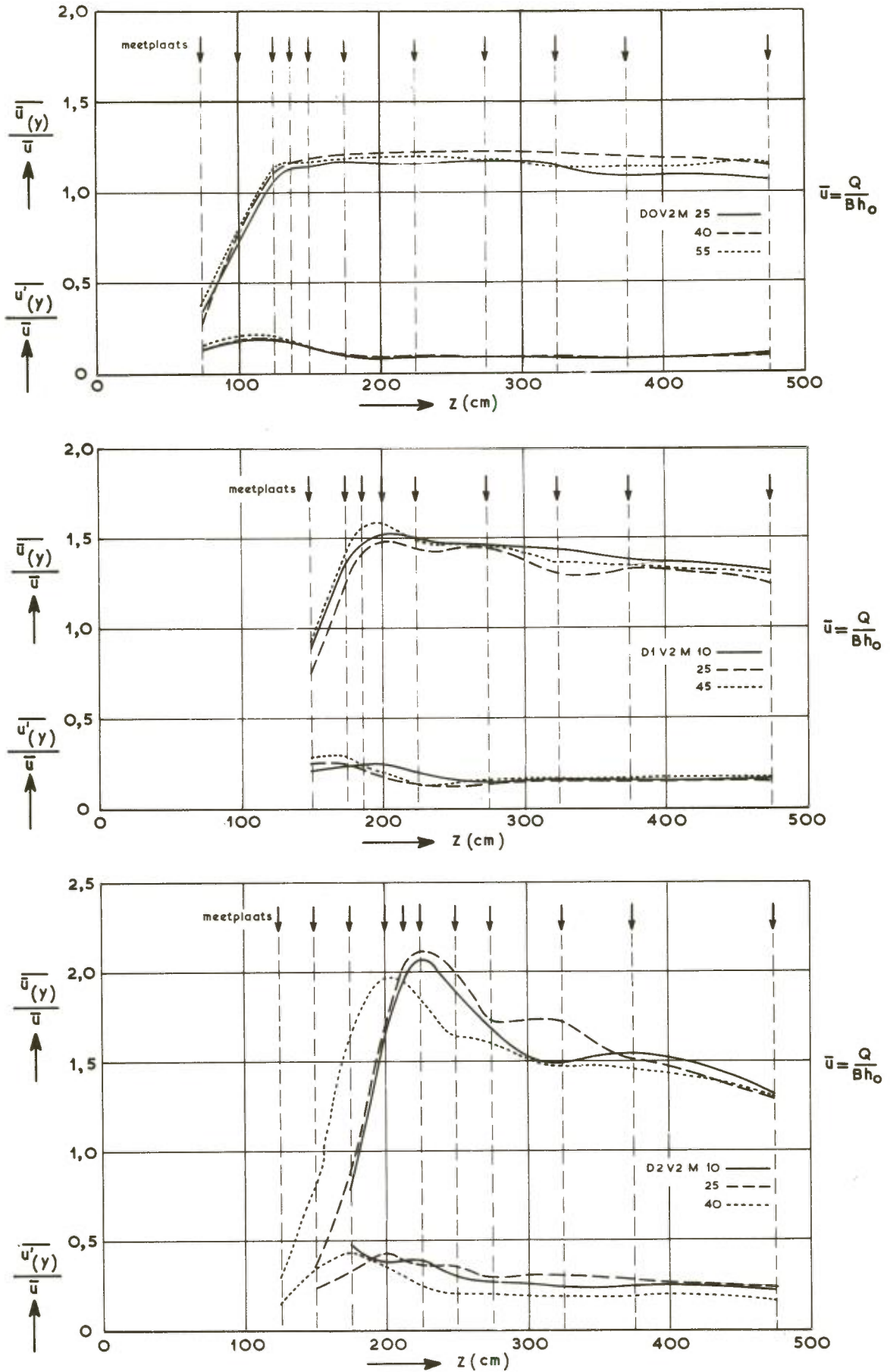
D0V2M25	D1V2M10	D2V2M10
D0V2M40	D1V2M25	D2V2M25
D0V2M55	D1V2M45	D2V2M40

b) proeven met vastgelegde ontgrondingskuil

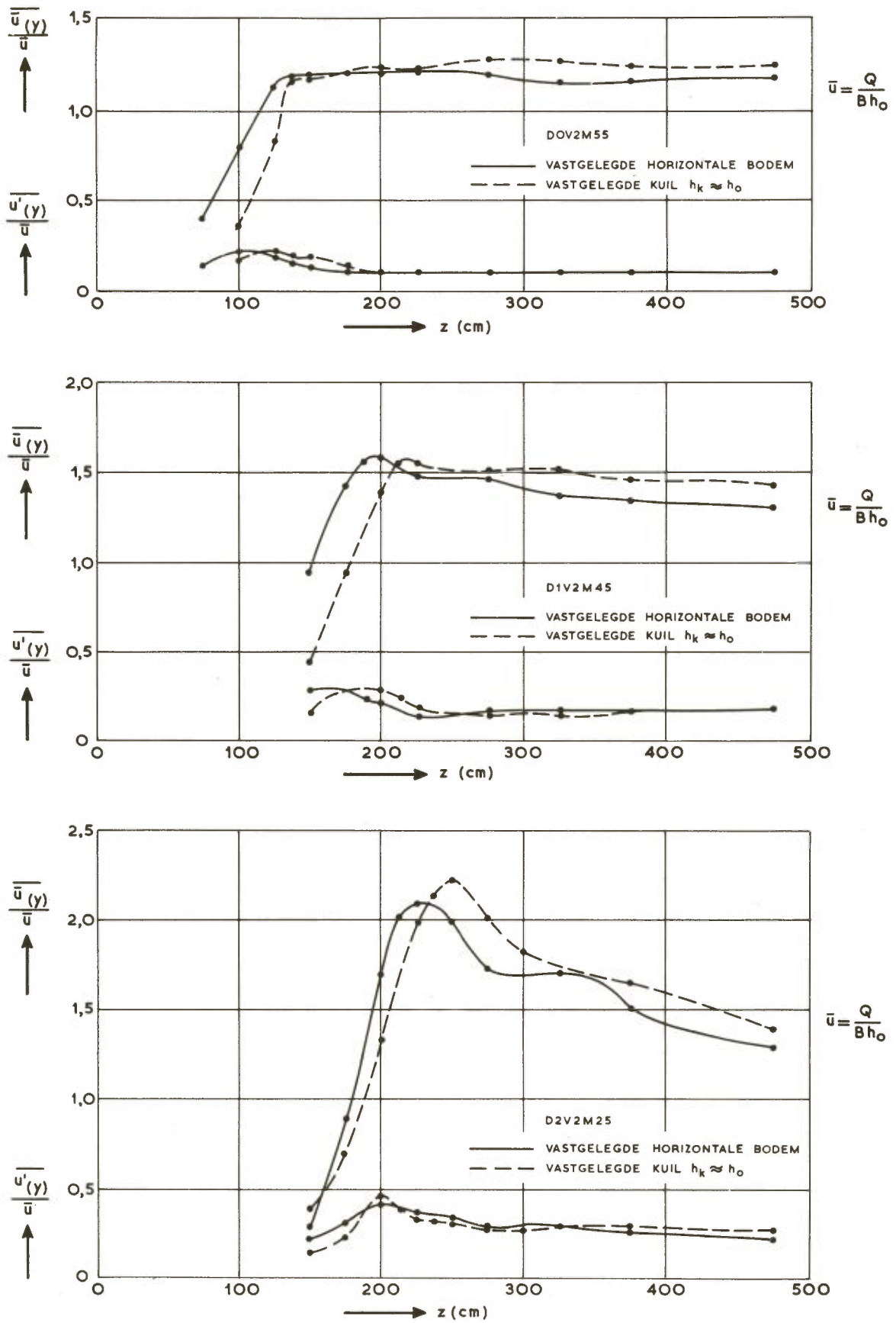
D0V2M55	D1V2M45	D2V2M25
---------	---------	---------

Bij elke situatie werd met een mikromolen in een tiental vertikalen, waarvan de plaats afhankelijk werd gesteld van de optredende stroomverdeling, in tien meetpunten op respectievelijk 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12,5, 15, 18 en 22 cm vanaf de bodem gedurende twee minuten de gemiddelde stroomsnelheid  $\bar{u}(y)$  en de turbulentie-intensiteit  $u'(y)$  gemeten. De meetwaarden zijn per vertikaal gemiddeld en, om de verschillende proeven beter te kunnen vergelijken, gedeeld door de ingestelde gemiddelde stroomsnelheid  $\bar{u} = Q/Bh_o$ . De resultaten zijn weergegeven in de figuren 32 en 33.





Figuur 32. Stroomverdelingen bij diverse debieten (vaste horizontale bodem).



Figuur 33. Stroomverdelingen bij vaste horizontale bodem en bij vastgelegde ontgrondingskuil.

Uit figuur 32 blijkt, dat hoewel er enige spreiding in de vertikaalgemiddelden aanwezig is, deze toch zodanig is, dat van een systematische invloed van de gemiddelde stroomsnelheid op de stroomverdeling niet gesproken kan worden. Alleen proef D2V2M40 toont een afwijkend beeld; dit is echter verklaarbaar uit het feit, dat bij het hierbij ingestelde debiet op de drempel schietend water bleek op te treden. Zolang schietend water op de drempel wordt voorkomen, kan de stroomverdeling aan het einde van de bodemverdediging dus als onafhankelijk van het debiet worden beschouwd. Wel wordt de stroomverdeling merkbaar beïnvloed door de drempelhoogte, zoals als nevenresultaat uit figuur 32 is af te lezen. Duidelijk is te zien, hoe met toenemende drempelhoogte de stroom een steeds sterkere contractie ondergaat, terwijl bovendien over de volle breedte de turbulentie in intensiteit toeneemt. Dat deze verschillen ook in plaats en tempo van de ontgronding tot uiting komen, is uit figuur 31 reeds gebleken.

Bleek dus op grond van figuur 32 geen invloed van de gemiddelde stroomsnelheid op de snelheidsverdeling te konstateren, beschouwing van figuur 33 leidt daartegenover tot de konklusie, dat de aanwezigheid van de ontgrondingskuil de stroomverdeling onmiskenbaar beïnvloedt. Aan de zijde van het dwarschot treedt ten opzichte van de stroomverdeling bij horizontale bodem een systematische verschuiving op, waardoor de maximale snelheidsgradiënt ter plaatse en de maximale waarden van gemiddelde snelheid en turbulentie-intensiteit meer naar het midden van de goot komen te liggen. Nadat de ontgrondingskuil gevormd is, wordt de stroom dus kennelijk verder uitgebogen en treedt een grotere contractie op dan daarvoor.

Dit verschijnsel, dat grote gelijkenis vertoont met de hierboven gesignaleerde stroomcontractie bij toenemende drempelhoogte, is als volgt te verklaren. Tengevolge van de profielverwijding (achter de drempel, respectievelijk in de kuil) treedt stroomvertraging op en loopt de waterstand op: een deel van de kinetische energie wordt omgezet in potentiële. Het negatieve verhang dat hierdoor ontstaat oefent een kracht uit in stroomopwaartse richting. De waterdeeltjes, die door het schot een scheef op de lengterichting van de goot staande baan beschrijven, zullen door de genoemde kracht een nog verdere zijdelingse uitwijking verkrijgen. Bij toenemende drempelhoogte wordt het uitbuigende effect steeds groter, tenzij het water over de drempel gaat schieten, waardoor de omstandigheden benedenstrooms zodanig veranderen dat de contractie weer afneemt. Eveneens wordt het uitbuigende effect groter bij toenemende diepte van de ontgrondingskuil: tijdens de ontwikkeling van de ontgrondingskuil gaat de bodemverdediging bovenstrooms daarvan steeds meer als "drempel" werken.



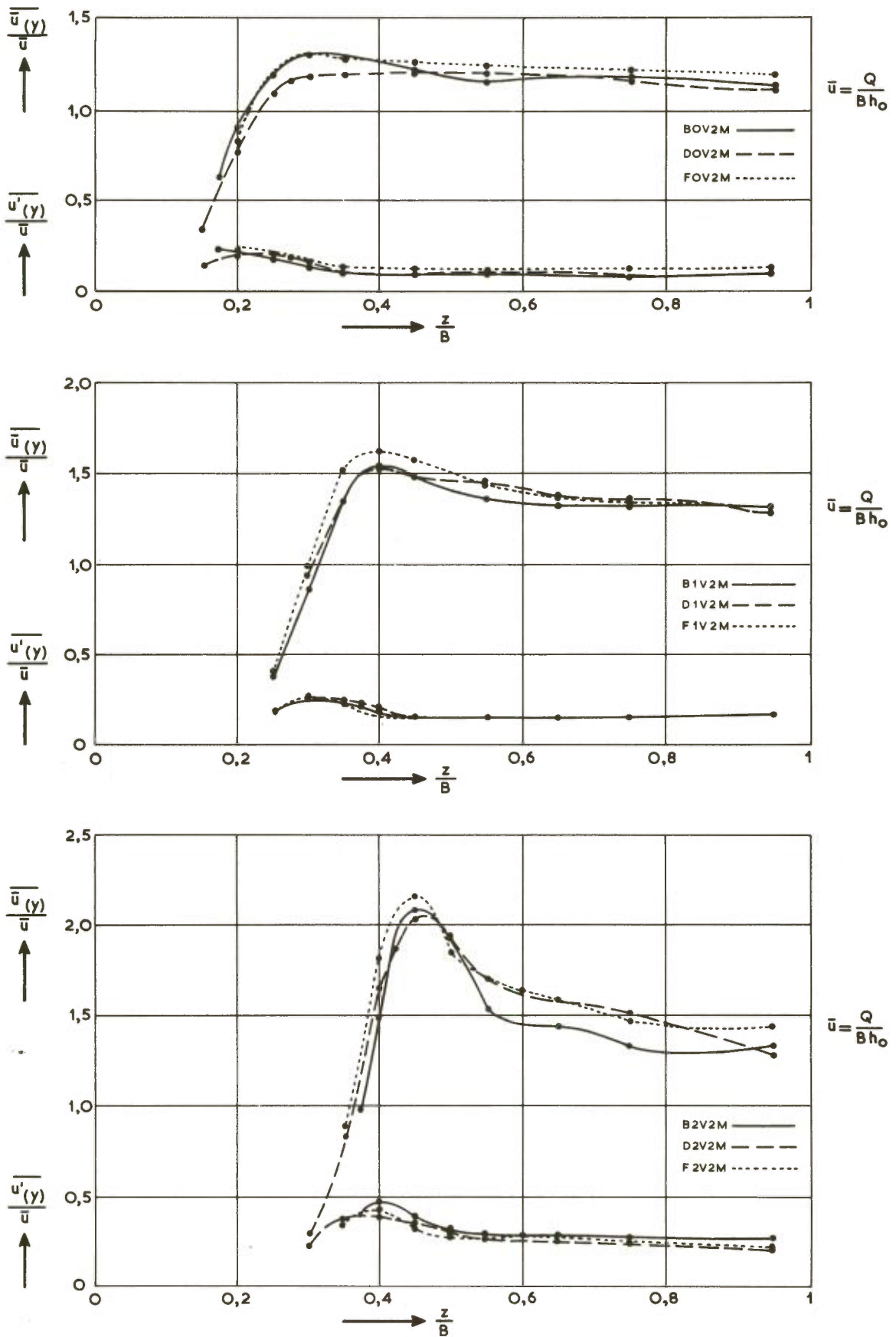
Uit het bovenstaande volgt, dat voor de overeenkomst in stroombeeld bij verschillende proeven de overeenkomst in kuilontwikkeling voorwaarde is. Anderzijds hangen vorm en ligging van de ontgrondingskuil echter in sterke mate af van het optredende, zich gedurig wijzigende stroombeeld. De gevonden onderzoekresultaten leiden dus tot het inzicht, dat de nauwe wisselwerking tussen stroombeeld en ontgrondingsproces, waarop in paragraaf 2.1. reeds is gewezen, niet alleen betrekking heeft op de verticale snelheidsverdeling, maar zich ook tot de horizontale snelheidsverdeling uitstrekt.

De konsekwentie hiervan is, dat de snelheidsverdelingen bij twee verschillende proeven alleen dan vergelijkbaar zijn, indien zij op vergelijkbare tijdstippen van het ontgrondingsproces zijn gemeten. Om deze tijdstippen te kunnen bepalen moet men de tijdschaal tussen de betreffende proeven kennen. Deze tijdschaal, gedefinieerd als de verhouding van de kenmerkende tijdsduren van beide ontgrondingsprocessen, kan in de regel echter pas na afloop van de proeven worden bepaald. Het is daarom in het algemeen niet goed mogelijk de vergelijkbaarheid van driedimensionale ontgrondingsproeven aan de hand van snelheidsmetingen te beoordelen. Vandaar ook, dat de in de bijlagen III-3a t/m 26a weergegeven resultaten van de bij het ontgrondingsonderzoek uitgevoerde snelheidsmetingen nogal eens wat spreiding vertonen. Behalve aan toevallige stringen en onvolkomenheden in de meettechniek is deze spreiding te wijten aan de ongelijke tijdstippen waarop de metingen zijn verricht.

Aan de andere kant zijn de veranderingen die door het ontstaan van de ontgrondingskuil in de stroomverdeling worden teweeggebracht, nu ook weer niet zo groot, dat aan een snelheidsmeting op een willekeurig moment van het ontgrondingsproces geen enkele waarde zou zijn toe te kennen. Voor een globale indruk van het bij de onderzochte geometrie behorende stroombeeld en ter controle van eventuele irreële afwijkingen kunnen snelheidsmetingen zeer nuttig zijn.

Eén moment is voor alle ontgrondingsproeven zonder meer vergelijkbaar, namelijk dat moment waarop het proces begint. Voor overeenkomst in het verloop van de ontgrondingsprocessen moeten dus de stroomverdelingen in de uitgangstoestand in ieder geval gelijk zijn. Om dit te controleren zijn ook in de B-goot en de F-goot, evenals in de D-goot, voorafgaand aan de ontgrondingsproeven de horizontale snelheidsverdelingen gemeten bij vastgelegde horizontale bodem. De resultaten van deze metingen zijn samengevat in figuur 34; de overeenkomst voor de verschillende situaties is bevredigend te noemen.

Uitgaande van gelijke stroomverdelingen aan het begin van de ontgrondingsproeven kan de vergelijkbaarheid tijdens het verdere verloop daarvan nu het beste



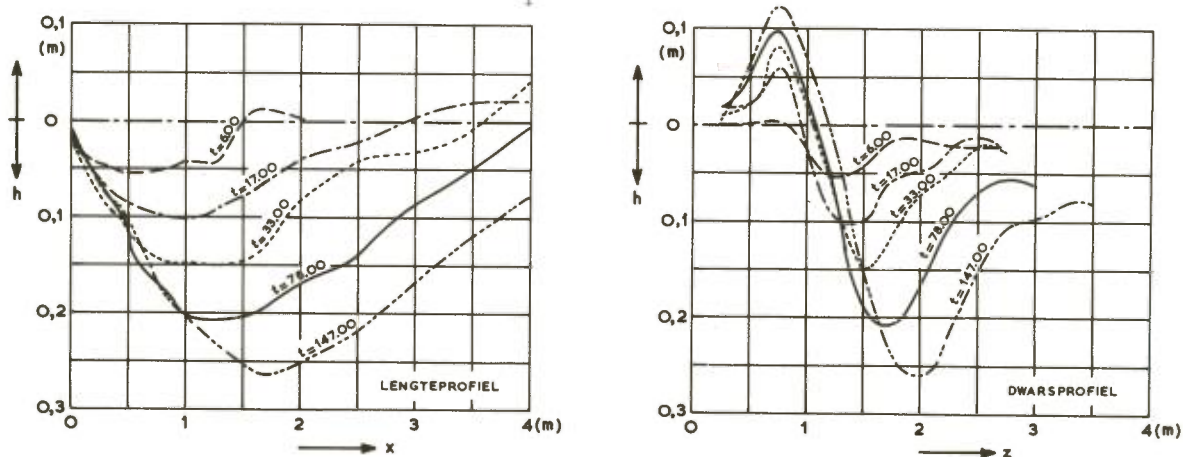
Figuur 34. Stroomverdelingen bij diverse gootafmetingen (vaste horizontale bodem).

direct aan de ontgrondingen zelf worden beoordeeld, door bij de verschillende instelcondities van schaal, debiet en materiaal de overeenkomst in vorm en situering van de ontgrondingskuil te toetsen voor overeenkomstige fasen van het ontgrondingsproces. Dit blijft echter steeds een controle achteraf, die pas kan worden uitgevoerd als op de een of andere wijze een tijdschaal is verkregen. De bepaling hiervan is dus eerst aan de orde.

### 4.3.3. Verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd

Bij de bestudering van de tijdsafhankelijkheid van het ontgrondingsproces is in de eerste plaats de aandacht gekoncentreerd op de wervelstraatkuil als meest kenmerkend element van de driedimensionale ontgraving. Daarbij is in navolging van het tweedimensionale onderzoek het gedrag van het diepste punt van deze kuil nader beschouwd, in de hoop dat dit gedrag representatief geacht mag worden voor de gehele kuilontwikkeling. Verondersteld is dus, dat de tijdschaal afgeleid uit het verloop van de maximale kuildiepte, voor de gehele driedimensionale kuil geldt. Of deze veronderstelling gerechtvaardigd is, zal moeten blijken uit de vergelijking achteraf van de ontgrondingsbeelden bij verschillende instelcondities en de mate van overeenstemming in kuilvorm en -situering op overeenkomstige tijdstippen van het ontgrondingsproces.

In figuur 35 is de ontwikkeling van de wervelstraatkuil voor een bepaald geval door middel van een aantal momentopnamen in beeld gebracht. Gegeven zijn de langs- en dwarsdoorsneden over het diepste punt van de kuil op een aantal tijdstippen van het proces.



Figuur 35. Langs- en dwarsdoorsneden over het diepste punt van de wervelstraatkuil voor diverse ontgrondingstijden.



Uit de figuur is te zien, dat het diepste punt zich zowel in lengterichting als in dwarsrichting van de goot verplaatst, waarbij de beschreven baan ongeveer de stroomrichting volgt. De toename van de maximale ontgrondingsdiepte blijkt met het voortschrijden van het proces steeds langzamer te verlopen, zoals ook bij de tweedimensionale ontgroning werd gekonstateerd.

Voor de relatie tussen maximale kuildiepte en ontgroningstijd zijn verscheidene wiskundige formuleringen beproefd. De resultaten van het tweedimensionale onderzoek (zie paragraaf 3.3.1.) gaven aanleiding de meetwaarden uit de driedimensionale ontgrondingsproeven te analyseren volgens een exponentieel verband van de vorm

$$\frac{h_{\max}}{h_o} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^p \quad (4.1)$$

terwijl daarnaast de toepasbaarheid van de logaritmische betrekking

$$\frac{h_{\max}}{h_o} = 1 + A \log \frac{t}{t_1} \quad (4.2)$$

werd onderzocht. Hierbij hebben de gebruikte symbolen een analoge betekenis als bij het tweedimensionale onderzoek, namelijk:

$h_{\max}$	= maximale ontgrondingsdiepte van de wervelstraatkuil	[ m ]
$h_o$	= oorspronkelijke waterdiepte	[ m ]
$t$	= ontgroningstijd	[ uren ]
$t_1$	= ontgroningstijd op het moment dat $h_{\max} = h_o$	[ uren ]

Uit de analyse van de meetresultaten bleek, dat met beide relaties een deel van het ontgrondingsproces beschreven kon worden, waarbij in het algemeen voor kleinere ontgrondingsdiepten ( $h_{\max} < 0,5 h_o$ ) het exponentiële verband beter voldeed en voor grotere het logaritmische verband. Deze uitkomst herinnert aan het (tweedimensionale) ontgrondingsonderzoek uit literatuur [10], die op het exponentiële verloop van het eerste deel van het ontgrondingsproces een logaritmische fase laat volgen. Ook de bij het onderzoek M 648 gesignaleerde tendens tot afname van de exponent bij langere ontgroningstijden (paragraaf 3.3.1.) wijst in dezelfde richting.

Nader onderzoek wees uit, dat in de gebieden waar de uitdrukkingen (4.1.), respektievelijk (4.2.) zich voor beschrijving van de tijdontgrondingsrelatie

lenen, de getalwaarden van de exponent  $p$ , respectievelijk van de coëfficiënt  $A$  redelijk onafhankelijk zijn van debiet, gootafmetingen en bodemmateriaal. Dit betekent dat ook bij driedimensionale ontgrondingen definitie van een tijdschaal mogelijk is, en dat de grootte  $t_1$  ook in dit geval een bruikbare parameter is om als vergelijkingsbasis te dienen voor ontgrondingsprocessen onder uiteenlopende condities.

Tevens bleek echter, dat zowel  $p$  als  $A$  verschillende waarden aannamen voor de drie onderzochte geometrieën, zodat beide tijdontgrondingsrelaties, in tegenstelling tot de voor tweedimensionale ontgrondingen geldende relatie (3.6.) (paragraaf 3.3.1.), geometrie-afhankelijk zijn. Dit betekent, dat men de betrekkingen (4.1.) of (4.2.) pas op een willekeurige driedimensionale geometrie kan toepassen, nadat men eerst een ontgrondingsproef bij die geometrie heeft uitgevoerd en uit de meetresultaten de grootte van  $p$  respectievelijk  $A$  heeft afgeleid. Heeft men bedoelde ontgrondingsproef echter eenmaal uitgevoerd, dan is daarmee het verband tussen  $h_{\max}$  en  $t$  in grafische vorm reeds gevonden en bestaat aan een analytische uitdrukking voor de tijdontgrondingsrelatie nauwelijks meer behoefte. Deze behoefte zou nog aanwezig kunnen zijn in geval voor de bepaling van  $t_1$  de metingen moeten worden geëxtrapoleerd. Gezien echter de beperkte geldigheid van de relaties (4.1.) en (4.2.) is het twijfelachtig, of men met een berekening van  $t_1$  een grotere nauwkeurigheid zou bereiken dan met een grafische extrapolatie, waarbij men de specifieke vorm van de betreffende tijdontgrondingslijn nog beter in aanmerking kan nemen.

Op grond van deze overwegingen is bij het driedimensionale onderzoek afgezien van een nader uitgewerkte analytische formulering voor de relatie tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd, en is eenvoudigweg gesteld:

$$\frac{h_{\max}}{h_0} = f\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (4.3.)$$

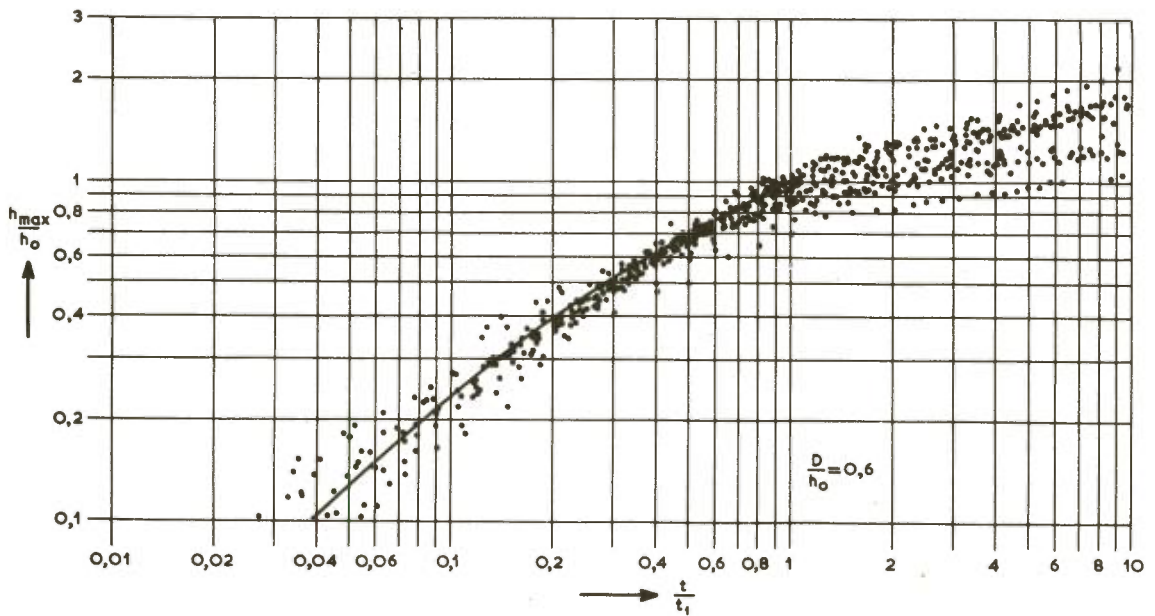
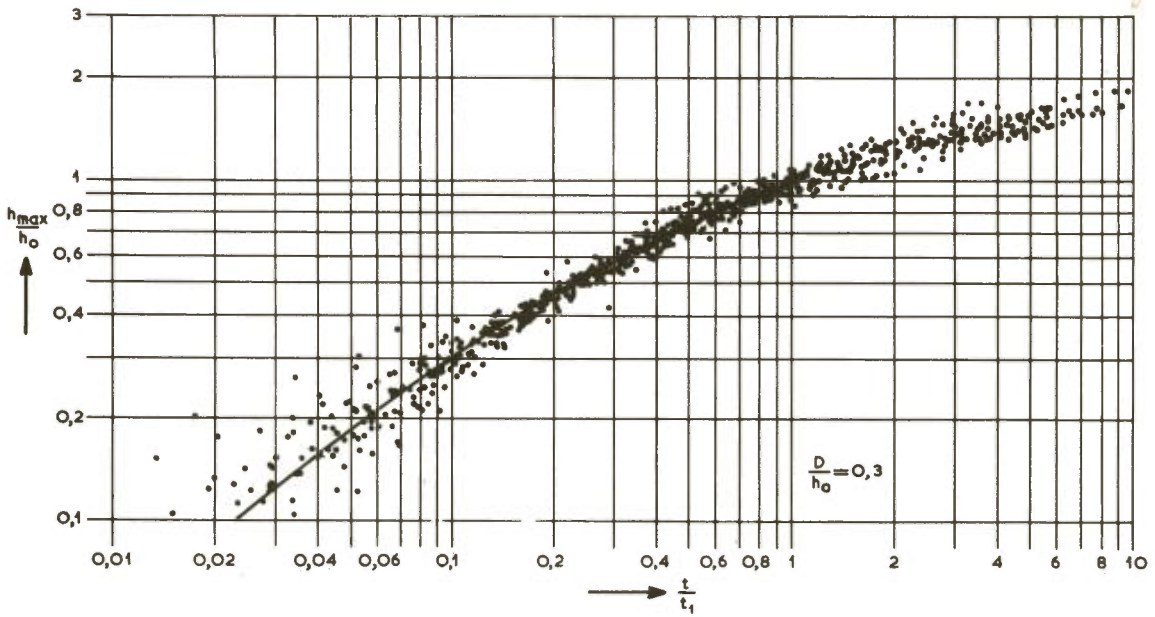
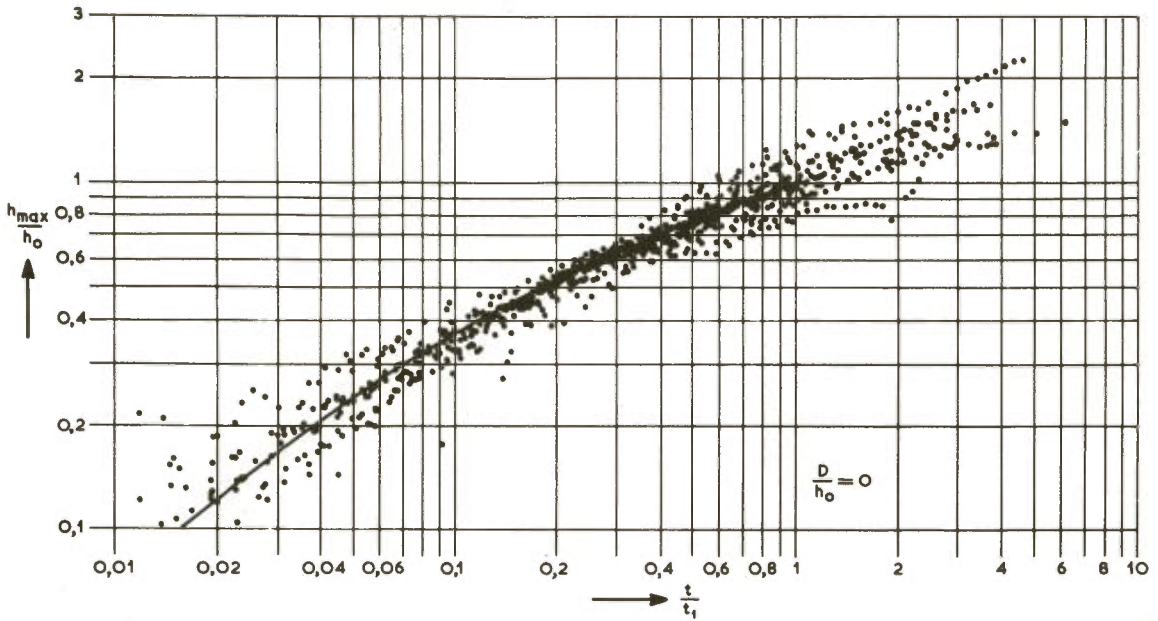
waarbij de functie  $f$  voor elke geometrie afzonderlijk experimenteel moet worden bepaald en in grafische vorm kan worden vastgelegd. Terwille van de vergelijkbaarheid met tweedimensionale ontgrondingen is die grafische weergave steeds op een dubbellogaritmische ondergrond uitgevoerd. Dit brengt bovendien het voordeel mee, dat bij het variëren van de tijdschaal of de diepteschaal - wat betekent: de waarde van  $t_1$  respectievelijk  $h_0$  met een bepaalde schaalfactor vermenigvuldigen - de tijdontgrondingslijn slechts langs de tijd-as of de diepte-as verschoven behoeft te worden maar niet van vorm verandert. De uit een modelproef gevonden tijdontgrondingslijn

lijn kan zodoende, met inachtnaam van de voor dat geval geldende tijd- en lengteschalen, direkt in dezelfde vorm op het prototype worden overgedragen.

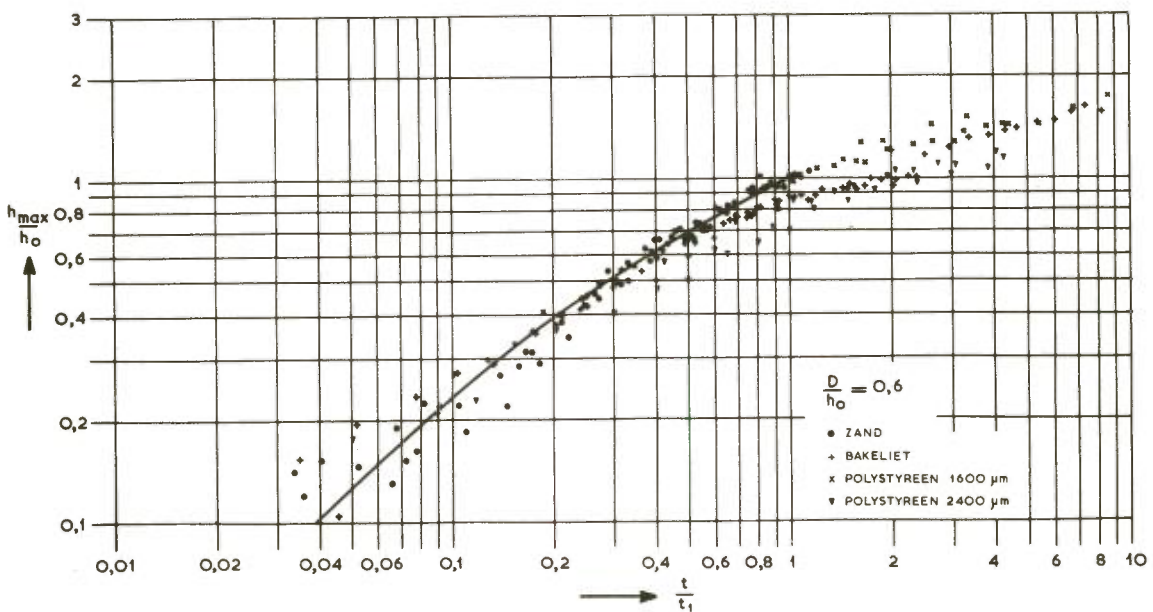
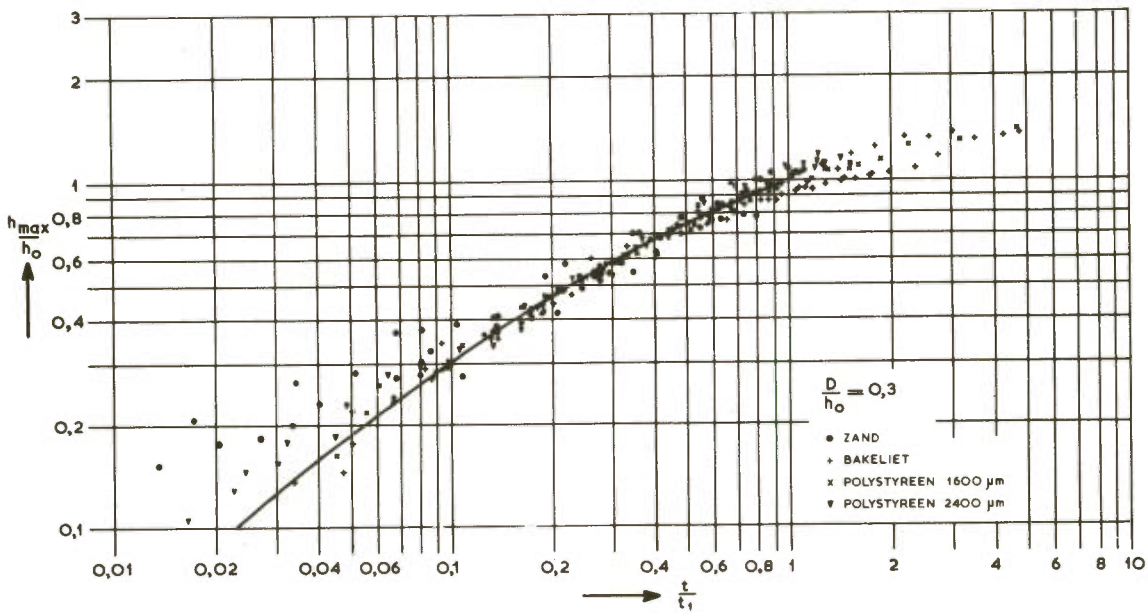
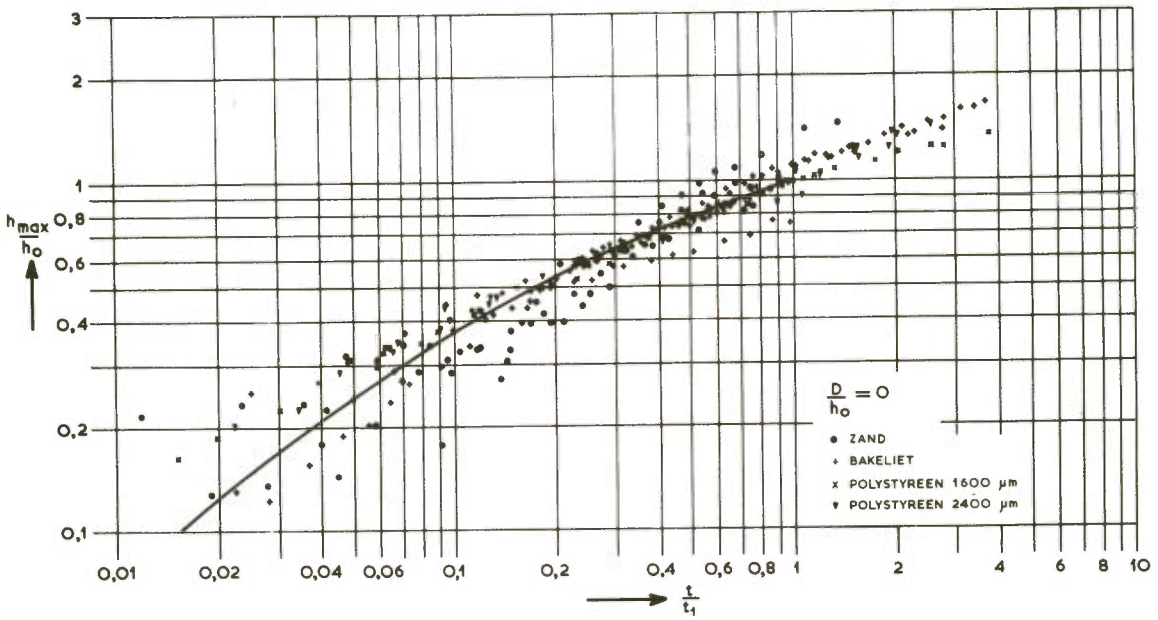
Om voor elk van de drie hier onderzochte geometrieën de meest passende vorm van de tijdontgrondingslijn te vinden, zijn de meetresultaten van alle ontgrondingsproeven per geometrie samengevoegd. Daarbij werden uit de peilingen de maximale ontgrondingsdiepten bepaald en, na deling door de ingestelde  $h_0$ -waarde, uitgezet als functie van de ontgrondingstijd. De zo verkregen tijdontgrondingsrelaties werden vervolgens zodanig langs de tijd-as verschoven, dat zij zo veel mogelijk over elkaar heen vielen. Op deze manier ontstond voor elke geometrie een bundel van waarnemingspunten, waardoorheen een zo goed mogelijk aansluitende lijn is getrokken, die voor de betreffende geometrie als standaard-tijdontgrondingslijn is aangehouden. De drie bundels voor de drie geometrieën zijn, met de bijbehorende standaardlijnen, weergegeven in figuur 36. Hoewel de verschillen in vorm niet bijzonder groot zijn, is toch duidelijk te constateren dat de lijnen steiler worden naarmate de drempelhoogte toeneemt. De spreiding van de meetwaarden valt over het geheel genomen binnen redelijke grenzen, zodat de functie  $f$  uit relatie (4.3.) inderdaad voor een bepaalde geometrie als eenduidig bepaald kan worden beschouwd. Bij groter wordende ontgrondingen ( $h_{\max} > h_0$ ) neemt deze overeenstemming in het ontgrondingsverloop onder verschillende kondities echter wel af.

Teneinde na te gaan of door het bijvoegen van de meetresultaten geen schaal- of materiaaleffekten zijn verdoezeld, zijn de puntenbundels nog gespecificeerd naar goot (= lengteschaal) en bodemmateriaal, voor zover in één bepaalde goot meerdere bodemmaterialen zijn onderzocht, respektievelijk één bepaald bodemmateriaal in meerdere goten is beproefd. Voorbeelden van dergelijke specificaties zijn gegeven in de figuren 37 en 38, waarin per geometrie respektievelijk de resultaten van alle metingen uitgevoerd in de F-goot en van alle metingen uitgevoerd met zand zijn gebundeld. De meest opvallende afwijking van het algemene beeld die uit deze specificaties viel op te maken, betrof het materiaal bakeliet, waarbij het ontgrondingsproces in sommige gevallen de neiging vertoont wat langzamer te verlopen dan bij de andere materialen. Daarnaast sprongen, zij het minder opvallend, een aantal proeven met zand in de F-goot er enigszins uit door hun verhoudingsgewijs steile tijdontgrondingslijnen. Wat precies de oorzaak van deze afwijkingen is, is niet goed duidelijk geworden. Gezien hun orde van grootte zijn zij echter zonder nadere verklaring geaksepteerd.

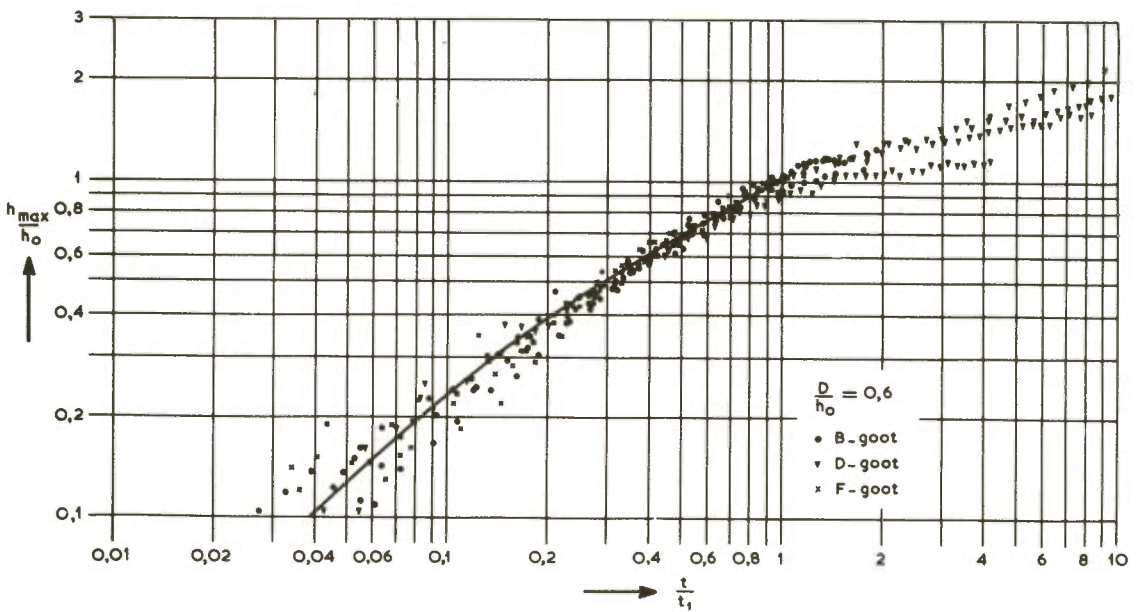
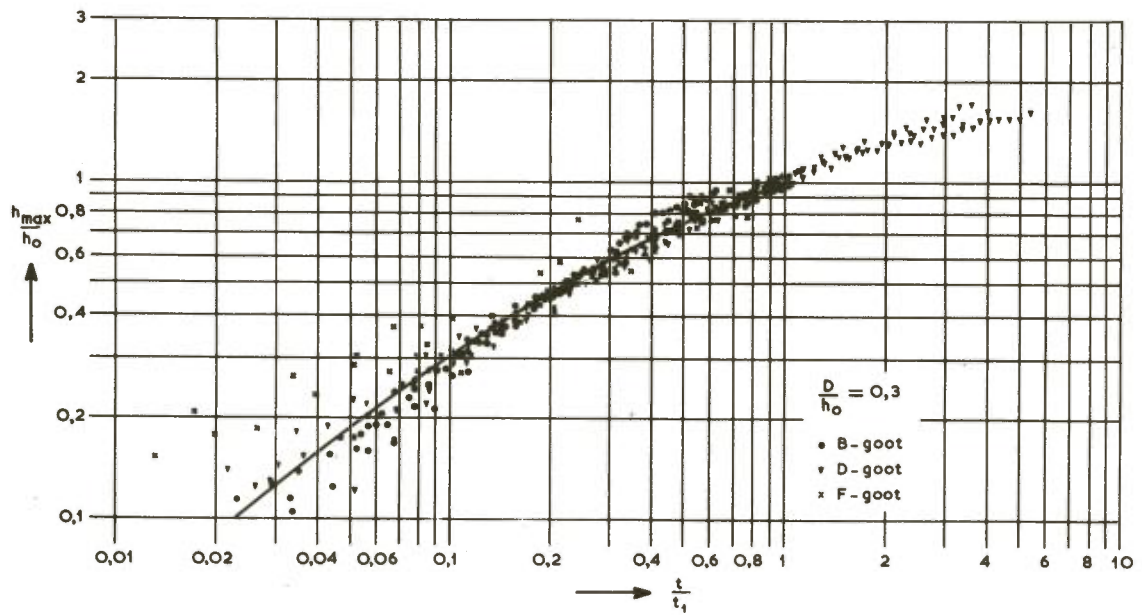
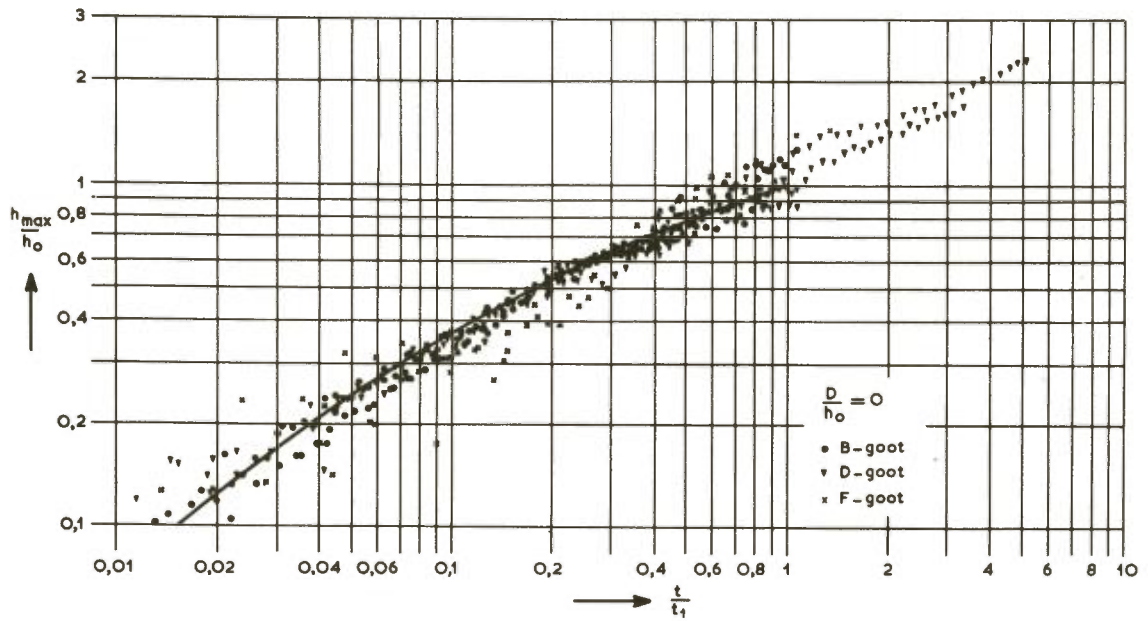




Figuur 36. Tijdontgrondingsrelaties voor de drie onderzochte geometrieën.



Figuur 37. Tijdontgrondingsrelaties voor diverse materialen (F-goot).



Figuur 38. Tijdontgrondingsrelaties voor diverse gootafmetingen (zand).



Met de standaard-tijdontgrondingslijnen is vervolgens voor elke proef de waarde van  $t_1$  bepaald. Wegens de bovengenoemde afwijkingen sluiten de op het geheel afgestemde standaardlijnen niet in alle gevallen goed bij de afzonderlijke metingen aan. In de meeste gevallen is dit echter wel het geval. Dit is na te gaan aan de hand van de bijlagen III-3a t/m 26a, waarin de meetresultaten van de ontgrondingsproeven zijn verzameld. De uit de grafieken afgelezen  $t_1$ -waarden zijn samengevat in bijlage III-1, waarin ook de bijbehorende instelkondities staan vermeld.

#### 4.3.4. Invloed van stroomsnelheid, bodemmateriaal, waterdiepte en geometrie op de ontgrondingstijd.

De afhankelijkheid van de kenmerkende ontgrondingstijd  $t_1$  van de instelkondities - met andere woorden: het verband tussen de tijdschaal en respectievelijk snelheidsschaal, materiaalschaal, lengteschaal en geometrische situatie - is aan de hand van de gegevens van bijlage III-1 onderzocht. Hierbij lag het voor de hand allereerst na te gaan, in hoeverre de reeds verkregen resultaten van het tweedimensionale onderzoek ook op de situatie met een wervelstraatkuil toe te passen zouden zijn. Deze enigszins spekulatieve aanpak leidde tot een verrassend resultaat: namelijk de konklusie, dat de invloed van de diverse factoren op het tempo van het ontgrondingsproces bij ontgrondingen veroorzaakt door een wervelstraat en bij ontgrondingen veroorzaakt door een tweedimensionaal stroombeeld door een en dezelfde relatie kan worden beschreven.

In de paragrafen 3.3.2. t/m 3.3.4. is deze relatie uit de meetresultaten van het tweedimensionale onderzoek afgeleid. Gevonden werd:

$$t_1 = 250 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\alpha\bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (4.4)$$

waarin de snelheidsinvloed wordt weergegeven door middel van de uitdrukking  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$ , de materiaalinvloed zowel in  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$  als in de grootte  $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$  en de invloed van de waterdiepte in de grootte  $h_o$  tot uitdrukking komt. In de uitdrukking  $(\alpha\bar{u} - u_{kr})$  is bovendien de invloed van de geometrie verdisconteerd door middel van de koëfficiënt  $\alpha$ . Omzetting in dimensieloze vorm van betrekking (4.4.) leidt tot de ook in de paragraaf 3.3.4. reeds neergeschreven schaalrelatie:

$$n_t = n \Delta^{1,7} \cdot n_h^2 \cdot n_{(\alpha\bar{u} - u_{kr})}^{-4,3} \quad (4.5.)$$

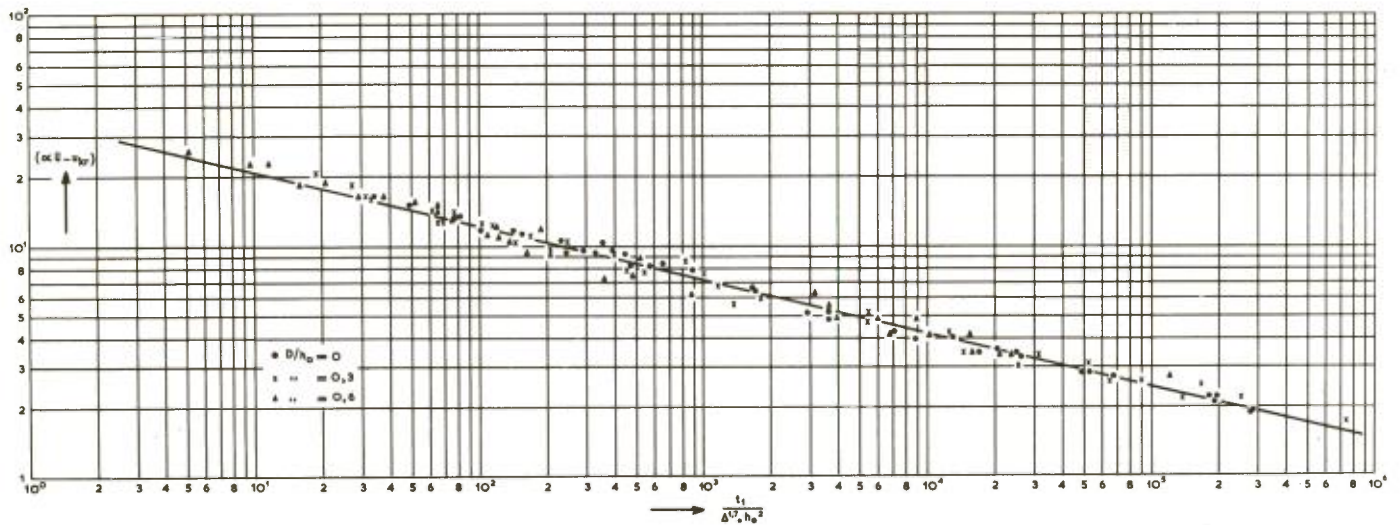
Bij de analyse van de driedimensionale ontgrondingsproeven zijn, evenals bij het tweedimensionale onderzoek, de invloeden van de diverse factoren eerst afzonderlijk onderzocht. Aanvankelijk werd daarbij alleen de vorm van relatie (4.4.) aan het tweedimensionale onderzoek ontleend, terwijl de getalwaarden van koëfficiënt en exponenten in eerste instantie onafhankelijk van de eerder verkregen uitkomsten werden bepaald. Nadat gebleken was, dat de meetresultaten van het driedimensionale onderzoek tot vrijwel dezelfde uitkomsten leidden - alleen voor de exponent van  $\Delta$  werd de neiging tot een iets hogere waarde geconstateerd (zie paragraaf 3.3.3.) - is voor de  $t_1$ -relatie een eensluitende formulering doorgevoerd, waarbij de uiteindelijke keuze van de koëfficiënt- en exponentwaarden op een optimale beschrijving van de twee onderzoeken tezamen is gebaseerd.

Met de aldus vastgestelde uitdrukking voor de ontgrondingstijd  $t_1$  is uit de meet- en instelgegevens van bijlage III-1 voor alle onderzochte gevallen de grootte van de koëfficiënt  $\alpha$  berekend. Een punt dat hierbij nog overweging verdiende, was de wijze waarop de gemiddelde stroomsnelheid  $\bar{u}$  zou worden gedefinieerd. In eerste instantie werd hiervoor gedacht aan de maximale waarde van de vertikaal gemiddelden, die zou korresponderen met de maximale ontgroning in de wervelstraatkuil. Om twee redenen bleek deze gedachte weinig zinvol: ten eerste omdat, zoals in paragraaf 4.3.2. beschreven is, het stroombeeld zich gedurende het ontgrondingsproces wijzigt, zodat het maximale vertikaalgemiddelde niet ondubbelzinnig is te bepalen; ten tweede omdat, zoals bij het tweedimensionale onderzoek gebleken is (zie paragraaf 3.3.2.), een vertikaalgemiddelde geen representatieve waarde is voor de invloed van de stroomsnelheid, daar voor de ontgroning de vorm van het snelheidsprofiel mede bepalend is.

Daar het bij  $\bar{u}$  zuiver gaat om een vergelijkingsgrootte bij variatie van de ingestelde stroomsnelheid, en de lokale stroomsnelheid evenredig is met de gemiddelde stroomsnelheid (geen invloed van de gemiddelde snelheid op de stroomverdeling, zie paragraaf 4.3.2.), ligt het voor de hand  $\bar{u}$  te definiëren als het quotiënt  $Q/Bh_0$ , welke waarde niet alleen eenvoudig maar ook eenduidig is te bepalen. Deze definitie van  $\bar{u}$  heeft tot gevolg dat bij een driedimensionaal stroombeeld in de koëfficiënt  $\alpha$ , die de verhouding aangeeft tussen de voor de ontgroning maatgevende waarde van de stroomsterkte en de gemiddelde snelheid, naast de componenten  $\alpha_r$  en  $\alpha_v$  als aandelen voor respectievelijk turbulentie-intensiteit en verticale snelheidsverdeling ook een component voor de horizontale snelheidsverdeling besloten is. Omdat echter ook de horizontale snelheidsverdeling door de geometrie wordt bepaald, brengt dit geen principiële verandering met zich mee, maar blijft de grootte  $\alpha$  de (experimenteel te bepalen) uitdrukking voor de invloed van de plaatselijke geometrie op de ontgroning.



De berekende waarden van de  $\alpha$  zijn in bijlage III-1 opgenomen. Er blijkt een significant verschil in  $\alpha$ -waarden te bestaan tussen de verschillende geometrieën. Per geometrie bestaat een redelijke overeenstemming, hoewel de spreiding duidelijk groter is dan bij de tweedimensionale proeven. Dit is niet verwonderlijk, gezien de meer gekompliceerde situatie bij het driedimensionale ontgrondingsproces, waardoor de kans op allerlei instel- en meeton nauwkeurigheden en het effect van toevallige storingen ook een orde groter is. Desondanks voldoen de meetresultaten heel behoorlijk aan de theoretische beschrijving van relatie (4.4.). Dit kan aan de hand van figuur 39 worden geverifieerd, waarin  $t_1 / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  is uitgezet tegen  $(\bar{a}u - u_{kr})$  en voor elke geometrie een konstante  $\alpha$  (het gemiddelde van de berekende waarden) is aangehouden.



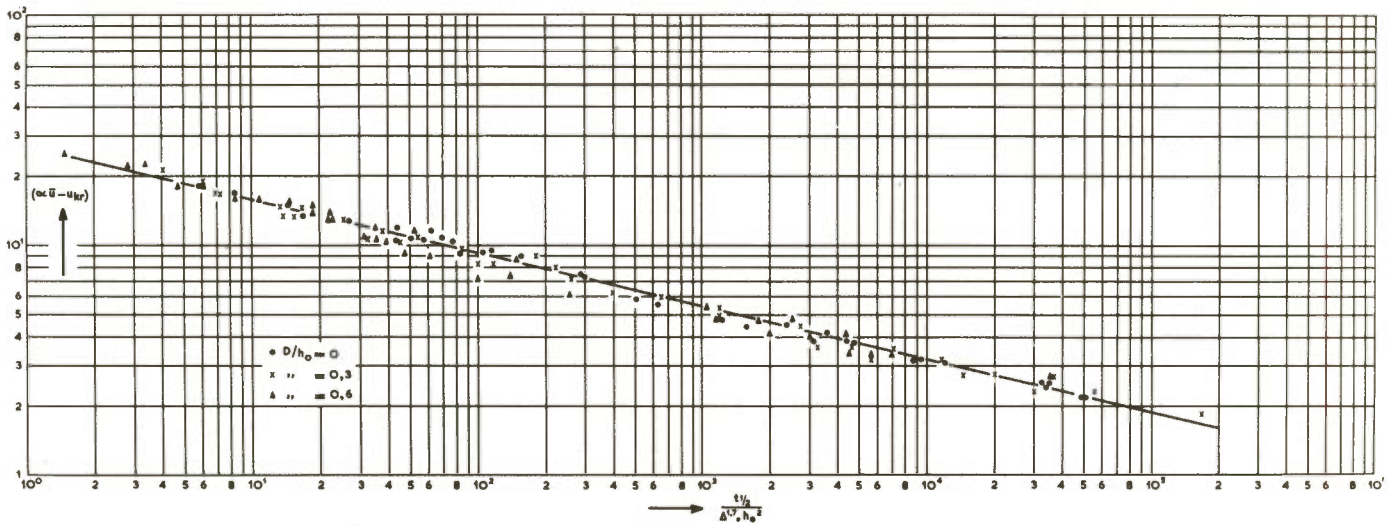
Figuur 39. Verband tussen  $t_1 / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\bar{a}u - u_{kr})$

Om in die praktijkgevallen, waarin om enigerlei reden de ontgrondingsproef moet worden afgebroken voordat  $h_{max} = h_o$  geworden is, tegemoet te komen aan het bezwaar het tijdstip  $t = t_1$  door extrapolatie van de tijdontgrondingslijn te moeten bepalen, is nagegaan of ook een kortere ontgrondingstijd als basis voor de tijdschaal zou kunnen worden gebruikt. Daartoe is ingevoerd de grootheid  $t_{1/2}$ , gedefinieerd als de ontgrondingstijd op het moment waarop  $h_{max} = 1/2 h_o$ . Uit een analoge optimaliseringsberekening als is uitgevoerd voor de  $t_1$ -relatie volgde, dat ook de grootheid  $t_{1/2}$  zich leent voor de bepaling van de tijdschaal. Het verband tussen  $t_{1/2}$  en de instelcondities blijkt namelijk door een nagenoeg gelijklopende relatie als (4.4.) te kunnen worden weergegeven, waarbij alleen de getalwaarde van de coëfficiënt een verandering ondergaat:



$$t_{1/2} = 75 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (4.6.)$$

De tijdschaalrelatie (4.5.) ondervindt van deze verandering geen gevolgen, daar hierbij de koëfficiënt wegvalt. De beschrijving van de meetresultaten met relatie (4.6.) is van dezelfde nauwkeurigheid als die met relatie (4.4.). Zonder alle  $t_{1/2}$ -waarden expliciet te vermelden is dit voor het driedimensionale onderzoek geïllustreerd in figuur 40.



Figuur 40. Verband tussen  $t_{1/2} / \Delta^{1,7} \cdot h_o^2$  en  $(\bar{u} - u_{kr})$ .

4.3.5. Konsekwenties van de tijdschaalformule voor het ontgrondingsbeeld.

De in het voorgaande gegeven relaties gelden voorsnog alleen voor het diepste punt van de wervelstraatkuil, gezien het feit dat tot nu toe uitsluitend de tijdsafhankelijkheid van de maximale kuil diepte in beschouwing is genomen. Zoals reeds is opgemerkt op het moment dat deze beperking werd ingevoerd, moet de algemene geldigheid van genoemde relaties worden geverifieerd aan de gelijkvormigheid van de ontgrondingsbeelden op vergelijkbare tijdstippen. Voordat tot deze verifikatie wordt overgegaan, moet echter op een konsekventie van de tijdschaalrelatie worden gewezen, die tot een interne tegenstrijdigheid voert en de uitvoerbaarheid van het driedimensionale ontgrondingsonderzoek enigszins op losse schroeven zet.

In het vooronderzoek naar de gelijkvormigheid van ontgrondingskuilen (paragraaf 2.2.) is voor de uitvoerbaarheid van ontgrondingsproeven op schaal uitgegaan van een invariante tijdschaal, dat wil zeggen een tijdschaal die voor alle punten en op alle tijdstippen dezelfde is. Dit uitgangspunt leidde tot de gelijkvormigheidseis voor de kuilprofielen op overeenkomstige tijdstippen van het ontgrondingsproces, aan welke eis in het tweedimensionale geval bleek te kunnen worden voldaan. Hierbij behoefde wat de invariantie voor de plaats betreft alleen de verschillende punten in een lengtedoorsnede te worden beschouwd, daar in een tweedimensionale situatie alle lengtedoorsneden per definitie identiek zijn. Bij de overgang naar driedimensionale situaties verandert dit en doen ook variaties in breedterichting hun intrede. Aan het einde van paragraaf 2.2. is ten aanzien hiervan reeds vermeld, dat een invariante tijdschaal in de breedterichting wegens de samenhang tussen tijdschaal en stromingscondities niet realiseerbaar is. Het is deze opmerking die hier een nadere toelichting behoeft en waarvan de gevolgen onder ogen gezien zullen moeten worden.

Bij een ontgrondingsproef op schaal zal men gewoonlijk voor het gehele model éénzelfde bodemmateriaal gebruiken, terwijl ook de lengte (= diepte) schaal voor het gehele model dezelfde zal zijn. Uit de schaalrelatie

$$n_t = n \Delta^{1,7} \cdot n_h^2 \cdot n_{(\alpha\bar{u} - u_{kr})}^{-4,3} \quad (4.7.)$$

volgt dan onmiddellijk:

$$n_t \sim n_{(\alpha\bar{u} - u_{kr})}^{-4,3} \quad (4.8.)$$

De schaalfactor  $n_{(\alpha\bar{u} - u_{kr})}$  heeft een van de plaats onafhankelijke waarde indien  $\alpha\bar{u}$  en  $u_{kr}$  over het gehele dwarsprofiel in model en prototype konstant zijn, of indien beide grootheden evenredig met elkaar variëren, dat wil zeggen de verhouding  $\alpha\bar{u}/u_{kr}$  konstant is. Het eerste geval doet zich voor bij een tweedimensionale situatie, waarvoor één gegeven stroomsnelheid en één door waterdiepte en materiaaleigenschappen bepaalde kritieke stroomsnelheid geldt. Voor een driedimensionale situatie is echter juist kenmerkend dat de stroomsnelheid en of de waterdiepte in dwarsrichting varieert, zodat hiervoor alleen de tweede genoemde voorwaarde in aanmerking komt. Aan deze voorwaarde kan niet worden voldaan, daar (zie paragraaf 3.3.2.) de waarde van  $u_{kr}$  wordt bepaald door bodemmateriaal en waterdiepte, en eventuele variaties in  $u_{kr}$  over het dwarsprofiel dus geen verband vertonen met de variaties van  $\alpha\bar{u}$ .



Voor driedimensionale situaties, waarbij de  $u_{kr}$  niet varieert over het dwarsprofiel (konstante waterdiepte) heeft de schaalfactor  $n_{(\bar{a}u - u_{kr})}$  een van de plaats onafhankelijke waarde, indien voldaan wordt aan  $n_{\bar{u}} = n_{u_{kr}}$ .

In het algemeen varieert dus bij driedimensionale ontgrondingen de waarde van  $n_{(\bar{a}u - u_{kr})}$  in de breedterichting van de ontgrondingskuil en daarmee de waarde van de tijdschaal  $n_t$ . Dat betekent dat de verhouding tussen de  $t_1$ -waarden van prototype en model of van twee schaalproeven onderling met de plaats in het dwarsprofiel verandert. Voor twee driedimensionale ontgrondingsprocessen op verschillende schalen zijn dus geen tijdstippen aan te geven waarop zij in een vergelijkbare fase verkeren, daar met een bepaald moment van het ene proces verschillende, van de plaats in het dwarsprofiel afhankelijke momenten van het andere proces korresponderen. Bijgevolg zijn ook geen vergelijkbare momentopnamen van de twee ontgrondingsprocessen te maken en bestaat er geen gelijkvormigheid tussen de driedimensionale ontgrondingsbeelden. Verschillen in ontgrondingsbeeld zullen echter aanleiding geven tot verschillen in stroombeeld aangezien, zoals uit paragraaf 4.3.2. gebleken is, tussen beide een wederzijdse beïnvloeding bestaat. Onder die omstandigheden wordt het de vraag of er niet een zodanige divergentie tussen de ontgrondingsprocessen in model en prototype zal optreden, dat van enige overeenkomst geen sprake meer is en afgezien dient te worden van driedimensionaal ontgrondingsonderzoek op schaal. Een andere, meer hoopvolle mogelijkheid is, dat weliswaar bepaalde schaafeffekten onvermijdelijk zijn, maar deze gezien hun omvang kunnen worden getolereerd.

Daar het eerste van deze twee alternatieven wel zeer onaantrekkelijk is, loonde het de moeite de kansen van het tweede alternatief na te gaan. Daartoe is onderzocht in hoeverre de ontgrondingsbeelden van de diverse proeven onderling overeenkomst vertonen op tijdstippen die uit de kuilontwikkeling op één plaats in het dwarsprofiel, namelijk ter plaatse van het diepste punt van de wervelstraatkuil, zijn afgeleid. Gekozen is het moment waarop  $h_{\max} = 0,6h_0$ ; bij de proeven met  $D/h_0 = 0$  viel dit tijdstip ongeveer samen met  $t = 0,25t_1$ , bij de proeven met  $D/h_0 = 0,3$  korrespondeerde het ongeveer met  $t = 0,3 t_1$  en bij de proeven met  $D/h_0 = 0,6$  ongeveer met  $t = 0,4t_1$ . De ontgrondingsbeelden op deze tijdstippen zijn gekarakteriseerd door middel van de dieptelijnen  $h = 0$  en  $h = 0,4h_0$ . In de bijlagen III-3b t/m 26b zijn deze ontgrondingsbeelden weergegeven, waarbij op analoge wijze als in de bijlagen III-3a t/m 26a steeds die proeven in één figuur zijn gekombineerd, waarbij bij een bepaalde combinatie van goot, bodemmateriaal en geometrie alleen de stroomsnelheid is gevarieerd.

Uit deze figuren is te zien, dat de verschillen in het ontgrondingsbeeld in vele gevallen gering zijn en vrijwel nergens een systematische samenhang vertonen

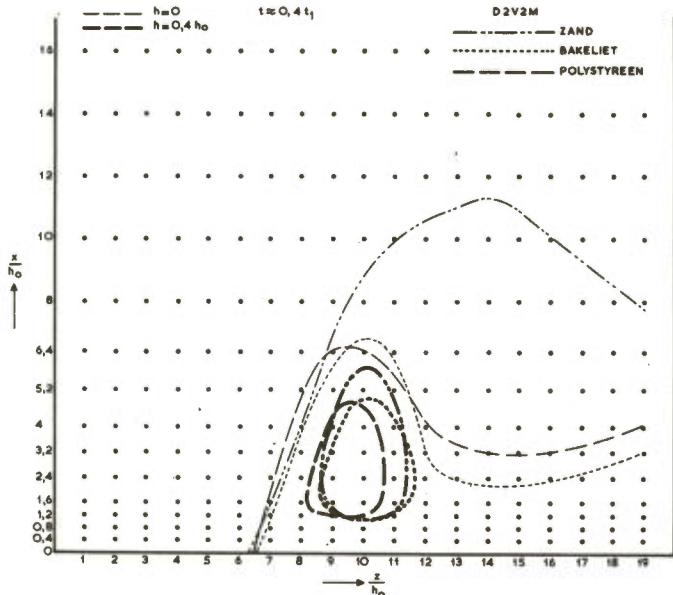
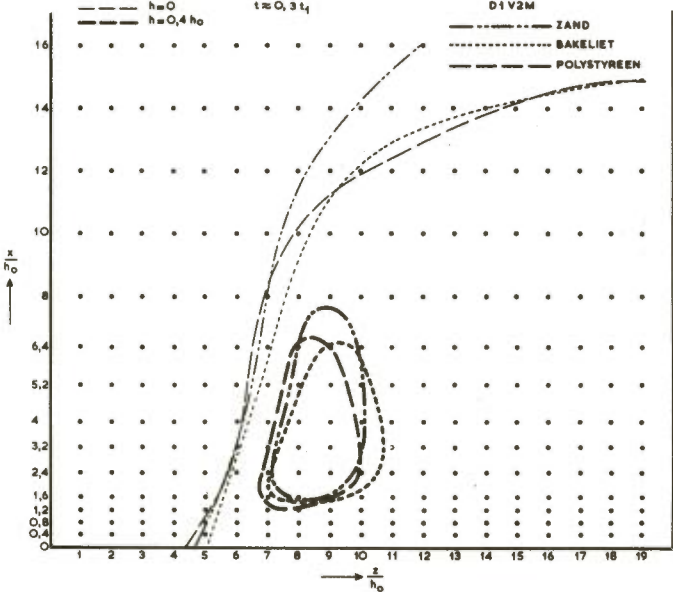
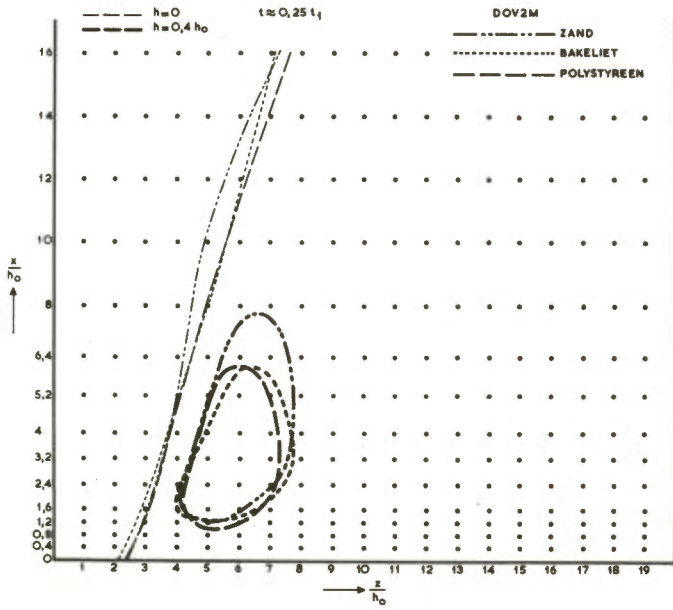


met de snelheidsvariaties. Vooral bij de proeven met geen of lage drempel is de overeenkomst in vorm en ligging van de wervelstraatkuil dikwijls verrassend goed, terwijl ook de grens tussen ontgroning en aanzanding ( $h + 0$ ) bij de verschillende stroomsnelheden doorgaans behoorlijk overeenstemt. Bij de proeven met  $D/h_0 = 0,6$  is de spreiding groter, wat echter een algemeen verschijnsel is en is toe te schrijven aan de onregelmatiger en heftiger waterbeweging in die situaties. Van een divergentie in de ontgrondingsbeelden kan dan ook niet worden gesproken.

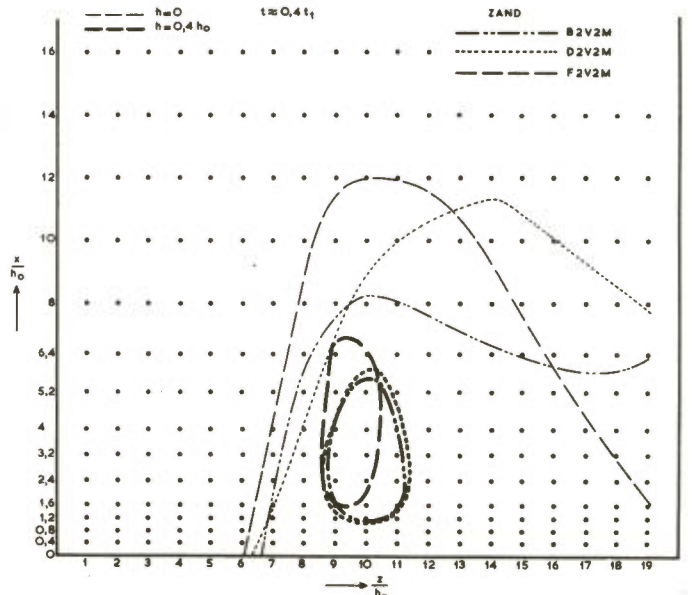
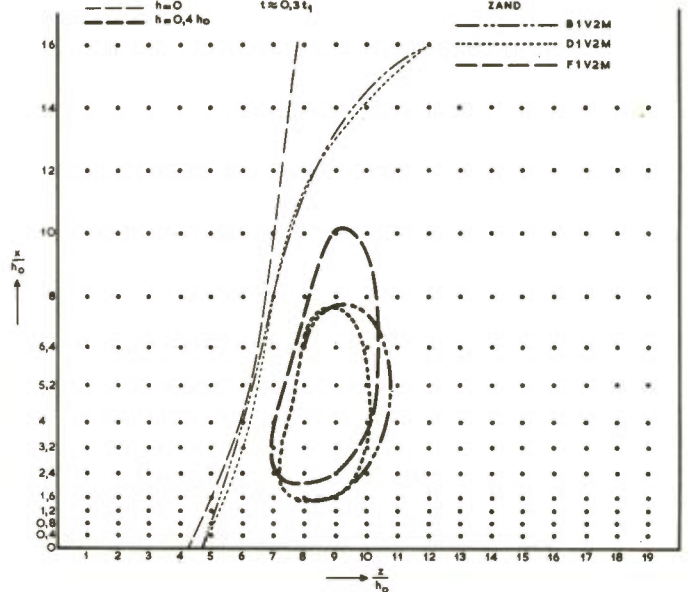
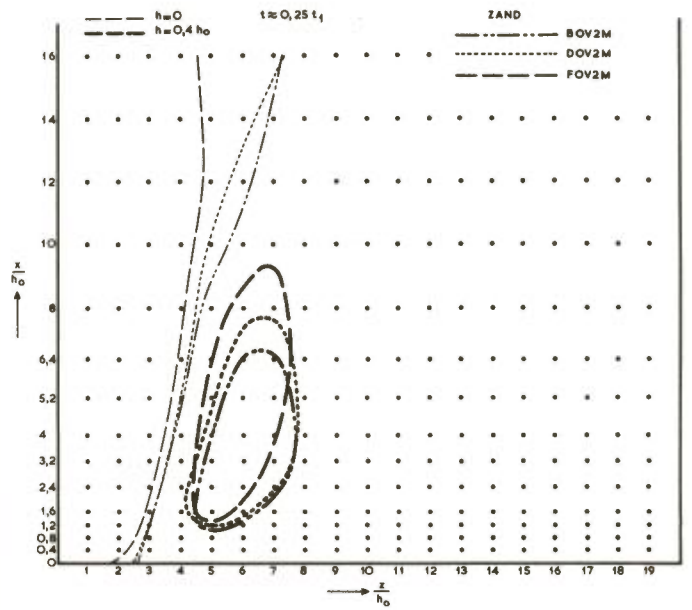
Niet alleen de gevolgen van variaties in de snelheidsschaal komen echter voor onderzoek in aanmerking, ook lengteschaal en materiaalschaal hebben, wegens  $u_{kr} = f(\bar{u}, h, \Delta, d)$  en dus  $n(\alpha\bar{u} - u_{kr}) = f(n_{\bar{u}}, n_h, n_{\Delta}, n_d)$ , invloed op het verloop van de tijdschaal in het dwarsprofiel en daarmee op de vertrekking van het ontgrondingsbeeld. Daarom zijn ook de ontgrondingsbeelden voor verschillende gootafmetingen en verschillende bodemmaterialen onderling vergeleken. Bij deze vergelijking kon worden geconstateerd dat weliswaar ondergeschikte verschillen optreden, maar dat over het geheel gezien vorm en omvang van de ontgroningen, ontstaan onder verschillende kondities, een opmerkelijke overeenkomst vertonen. Dit is geïllustreerd in de figuren 41 en 42, waarin per geometrie de ontgrondingsbeelden verkregen met drie verschillende materialen (in de D-goot), respectievelijk verkregen in drie verschillende goten (met zand) zijn gekombineerd. De in deze figuren gegeven dieptelijnen zijn samengesteld uit de beelden, die voor betreffende combinatie van goot en materiaal bij de verschillende onderzochte stroomsnelheden zijn gevonden.

Uit het onderzoek van de ontgrondingsbeelden is de volgende konklusie getrokken. Binnen de onderzochte schaalvariaties is de schaalafhankelijkheid van het driedimensionale ontgrondingsbeeld niet van dien aard, dat hiervan belangrijke verschillen in de stroomverdeling en daarmee in het verloop van het ontgrondingsproces het gevolg zullen zijn. En dit zelfs niet, ondanks de extreme vorm van de driedimensionale geometrie die bij het onderzoek is toegepast. Op grond hiervan mag worden verwacht dat het ongelijkvormig zijn van driedimensionale ontgroningen op verschillende schalen, hoewel principieel in strijd met het uitgangspunt, geen onaanvaardbare schaafeffekten in de driedimensionale ontgrondingsproeven zal introduceren.

Voor de bepaling van de tijdschaal zal echter niet met de observatie van een enkel punt in het dwarsprofiel kunnen worden volstaan, maar moet het ontgrondingsverloop in elke, of tenminste in een redelijk aantal langsdoorsneden afzonderlijk worden nagegaan. Voor elk van deze langsdoorsneden zal dan in het algemeen een andere, uit het ontgrondingsverloop af te leiden, tijdschaal gelden.



Figuur 41. Ontgrondingsbeeld voor diverse materialen (D-goot).



Figuur 42. Ontgrondingsbeeld voor diverse gootafmetingen (zand)

#### 4.3.6. Ontgrondingsverloop en kuilprofielen op verschillende plaatsen in het dwarsprofiel.

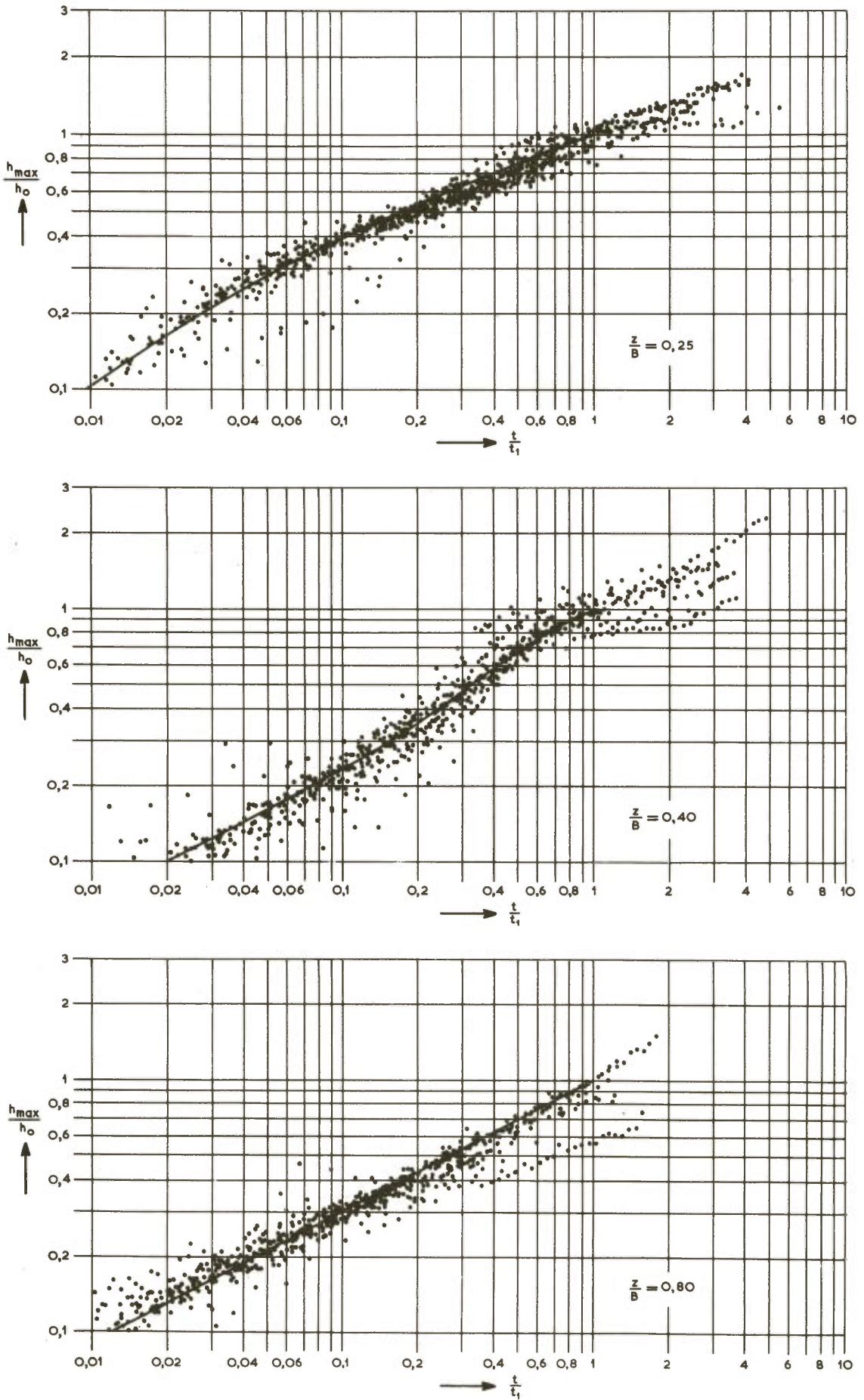
Als logisch uitvloeisel van de in de voorgaande paragraaf getrokken conclusies is vervolgens aan de hand van de verrichte proeven onderzocht, hoe de ontgrondingen zich op verschillende plaatsen in het dwarsprofiel ontwikkelen. Voor dit onderzoek zijn bij elke geometrie drie langsradien uitgekozen, die enigszins representatief te achten zijn voor het betreffende ontgrondingsbeeld. Bij de situatie zonder drempel liggen deze drie radien op afstanden van 0,25, 0,4 en 0,8 maal de gootbreedte, gemeten vanaf de kant waartegen het dwarsshot is aangebracht; bij de situatie met  $D = 0,3h_0$  liggen ze op 0,35B, 0,5B en 0,8B vanaf die kant en bij de situatie met  $D = 0,6h_0$  op 0,45B, 0,55B en 0,8B. De ligging van de langsradien is zo gekozen, dat de eerste van de drie ongeveer samenvalt met de plaats waar de wervelstraatkuil ontstaat, de tweede de wervelstraatkuil doorsnijdt wanneer de ontgroning geruime tijd is voortgeschreden, en de derde zich in het gebied bevindt waar de ontgroning een meer tweedimensionaal karakter bezit.

Voor elk van de beschouwde langsradien is uit de verrichte peilingen het verloop van de maximale ontgrondingsdiepte met de tijd afgeleid. Evenals in paragraaf 4.3.3. voor de maximale diepte van de wervelstraatkuil is gedaan zijn al deze tijdontgrondingsrelaties per geometrie gebundeld door ze in dimensieloze grootheden uit te drukken en zo goed mogelijk over elkaar heen te leggen. Uit het resultaat hiervan, dat in de figuren 43 t/m 45 is afgebeeld, volgt dat ook in een afzonderlijk langsradii het verband (4.3.)

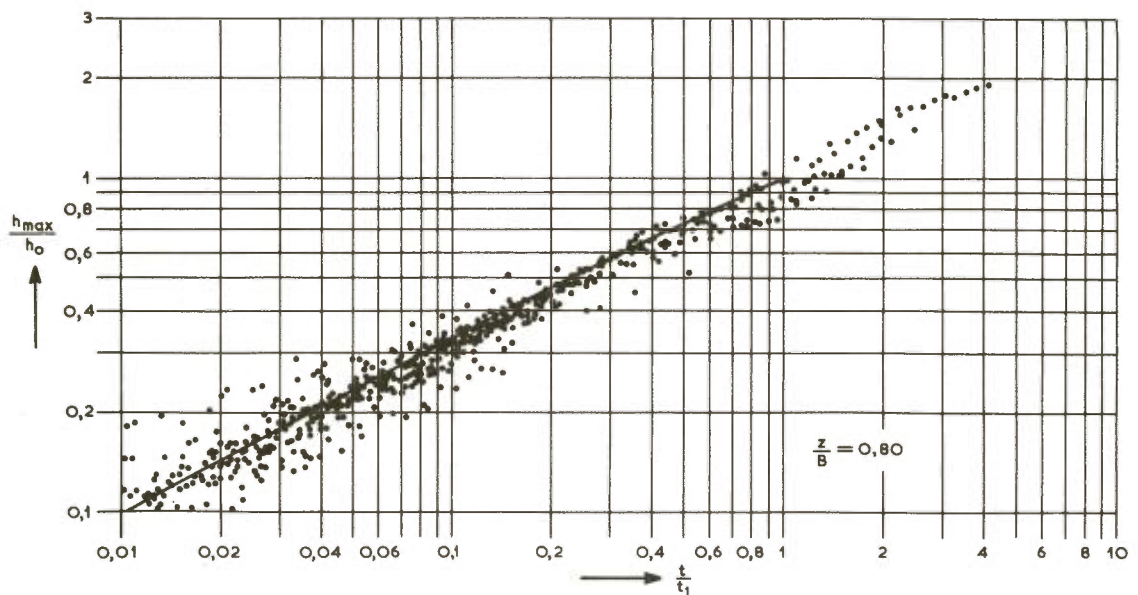
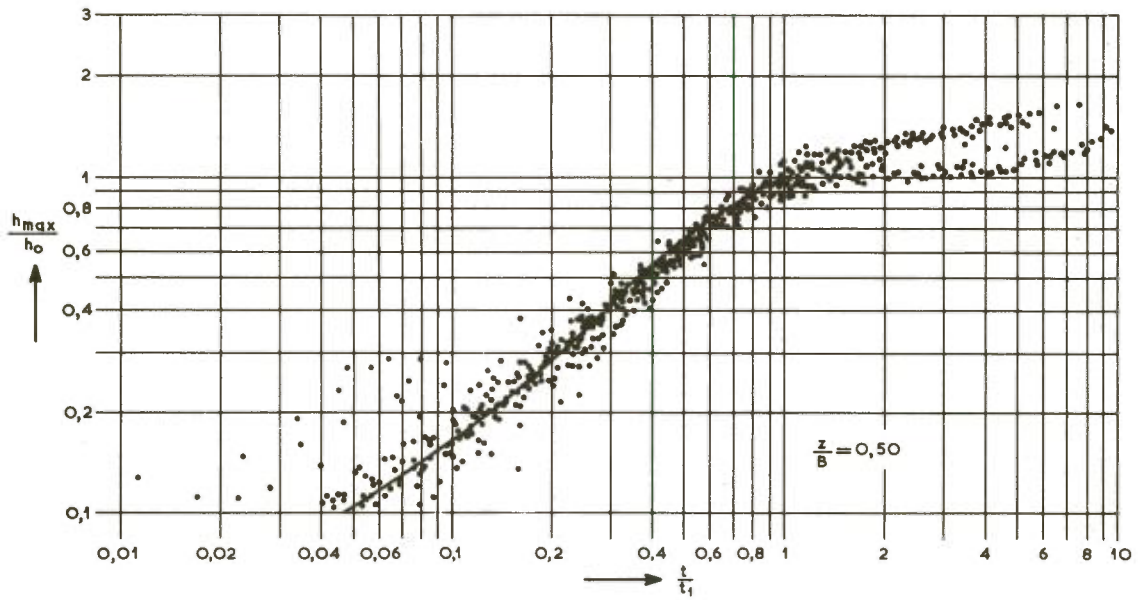
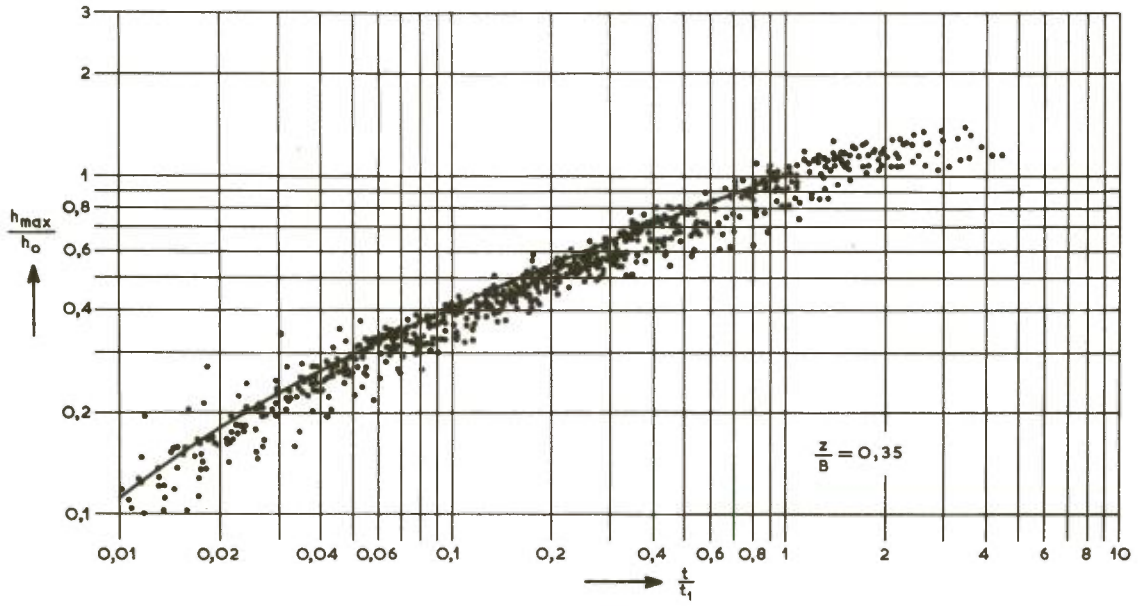
$$\frac{h_{\max}}{h_0} = f\left(\frac{t}{t_1}\right)$$

opgaat, welk verband voor elke bundel door middel van een standaard-tijdontgrondingslijn is vastgelegd. Tevens blijkt uit de figuren, dat de vorm van deze lijn niet alleen met de drempelhoogte varieert, maar ook met de plaats in het dwarsprofiel. Dit laatste is ook op te vatten als een uiting van de gekonstateerde geometrie-afhankelijkheid van de functie  $f$ : in een driedimensionaal geval wordt de geometrische situatie immers niet alleen door de eigenschappen van drempel en bodemverdediging bepaald, maar ook door de afstand tot de oevers of tot een andere diskontinuiteit in dwarsrichting (b.v. een damkop), dus door de plaats in het dwarsprofiel.

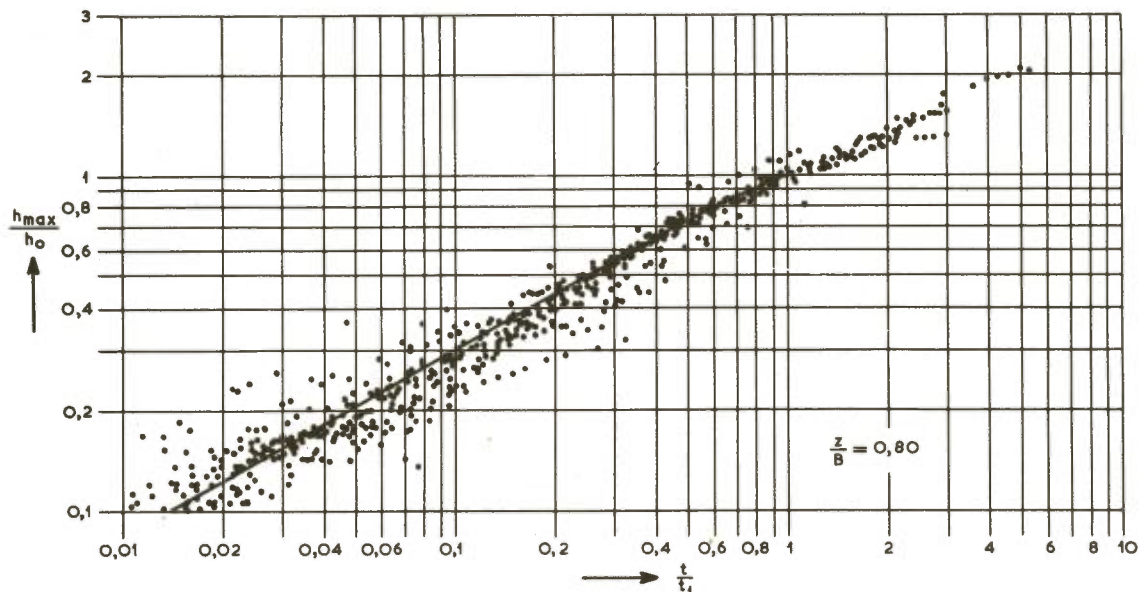
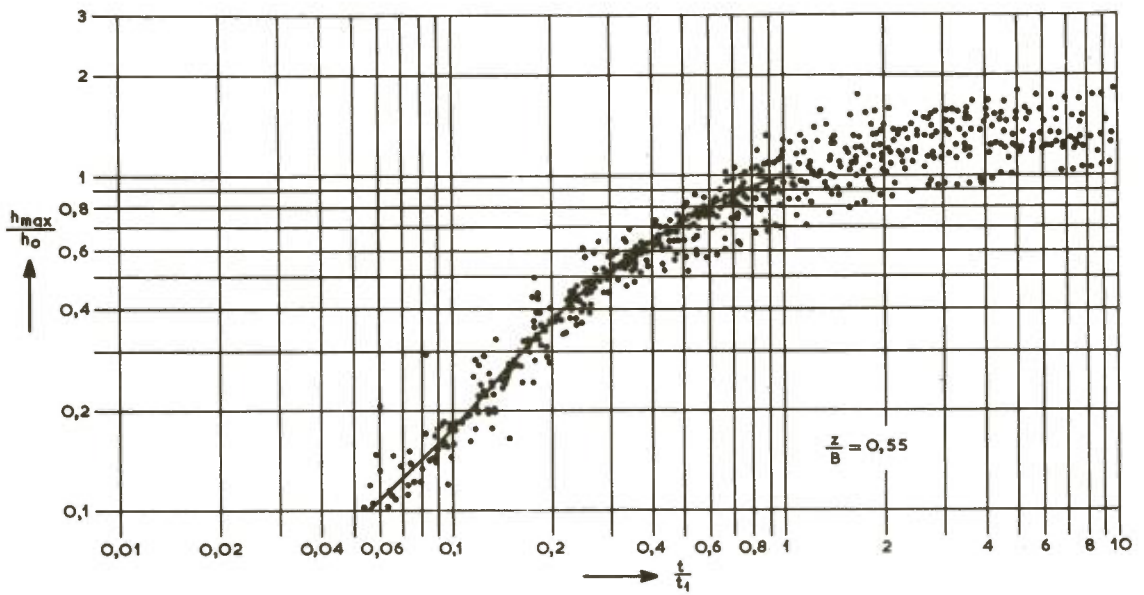
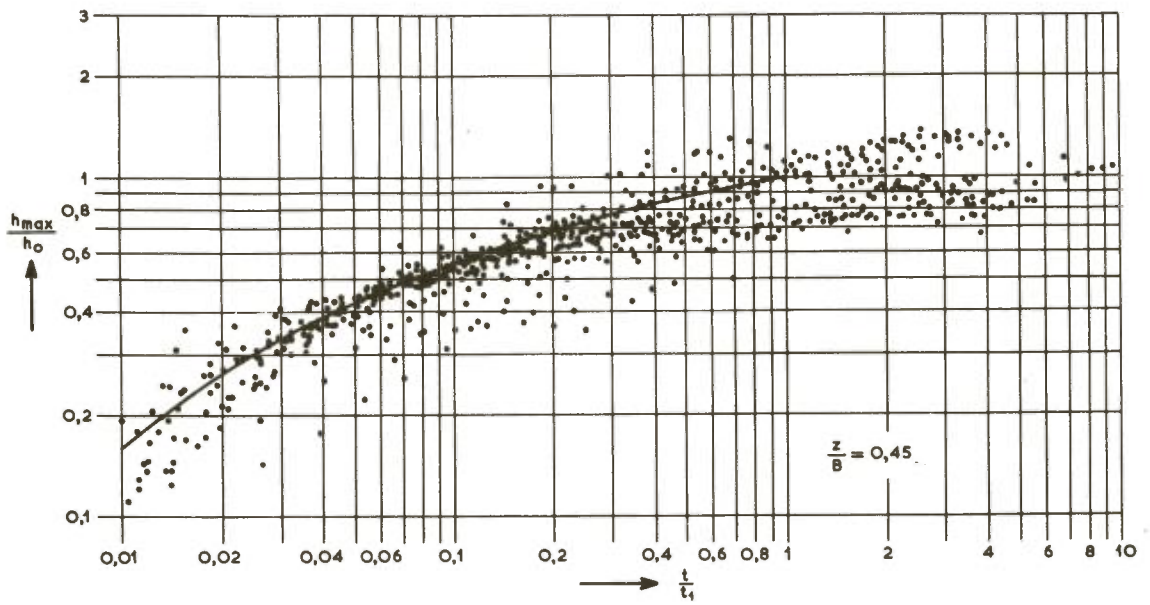




Figuur 43. Tijdontgrondingsrelaties voor 3 plaatsen in het dwarsprofiel ( $\frac{D}{h_0} = 0$ ).



Figur 44. Tijdontgrondingsrelaties voor 3 plaatsen in het dwarsprofiel ( $\frac{D}{h_0} = 0,3$ ).



Figuur 45. Tijdontgrondingsrelaties voor 3 plaatsen in het dwarsprofiel ( $\frac{D}{h_o} = 0,6$ ).



De vorm van de tijdontgrondingslijn in een bepaalde raai is tot op zekere hoogte kenmerkend voor de aard van de ontgroning ter plaatse. Een steil begin gevolgd door een afbuiging duidt doorgaans op een ontgroning onder invloed van wervelactiviteit, terwijl een flauwere maar meer continue helling een aanwijzing is voor een tweedimensionaal-verbante toestand. Een illustratie hiervan geven de figuren 43 t/m 45, waarin het verschil van karakter tussen de drie beschouwde raaien goed te herkennen is: de bovenste twee vallen binnen het invloedsgebied van de wervelstraat, de eerste direkt bij de aanvang van het ontgrondingsproces, de tweede na verloop van tijd, terwijl de onderste representatief is voor het gebied met een meer tweedimensionaal stroombeeld.

Met behulp van de standaard-tijdontgrondingslijnen voor de afzonderlijke langsraaien is weer voor elke proef de bijbehorende waarde van  $t_1$  (of  $t_{1/2}$ ) te bepalen. Het verband tussen deze kenmerkende ontgroningstijd en de ingestelde kondities van stroom, waterdiepte en bodemmateriaal blijkt ook voor elke raai afzonderlijk met behulp van de voor twee- en driedimensionale ontgrondingen geldende relatie (4.4.) of (4.6.) weergegeven te kunnen worden. Hierbij verdient het om dezelfde redenen als genoemd in paragraaf 4.3.4. aanbeveling voor elke raai  $\bar{u} = Q/Bh_0$  te nemen. De uit genoemde relatie te berekenen koëfficiënt  $a$  zal in het algemeen, afhankelijk van de driedimensionale geometrie en de daarmee samenhangende snelheids- en turbulentieverdeling, van raai tot raai een andere waarde hebben. Hoe groter de waarde van  $a$ , des te sneller het ontgrondingsproces zich voltrekt. Het verloop van de  $a$ -waarden over het dwarsprofiel geeft dus reeds een duidelijke indicatie omtrent de plaatsen waar de sterkste aantasting van de bodem te verwachten is. Deze indicatie zegt echter nog niet alles, daar ook de vorm van de tijdontgrondingsrelatie van invloed is: met gelijke  $t_1$ -tijden kunnen immers verschillende tijdontgrondingslijnen gepaard gaan, die op andere tijdstippen dan  $t = t_1$  tot verschillende ontgrondingsdiepten leiden.

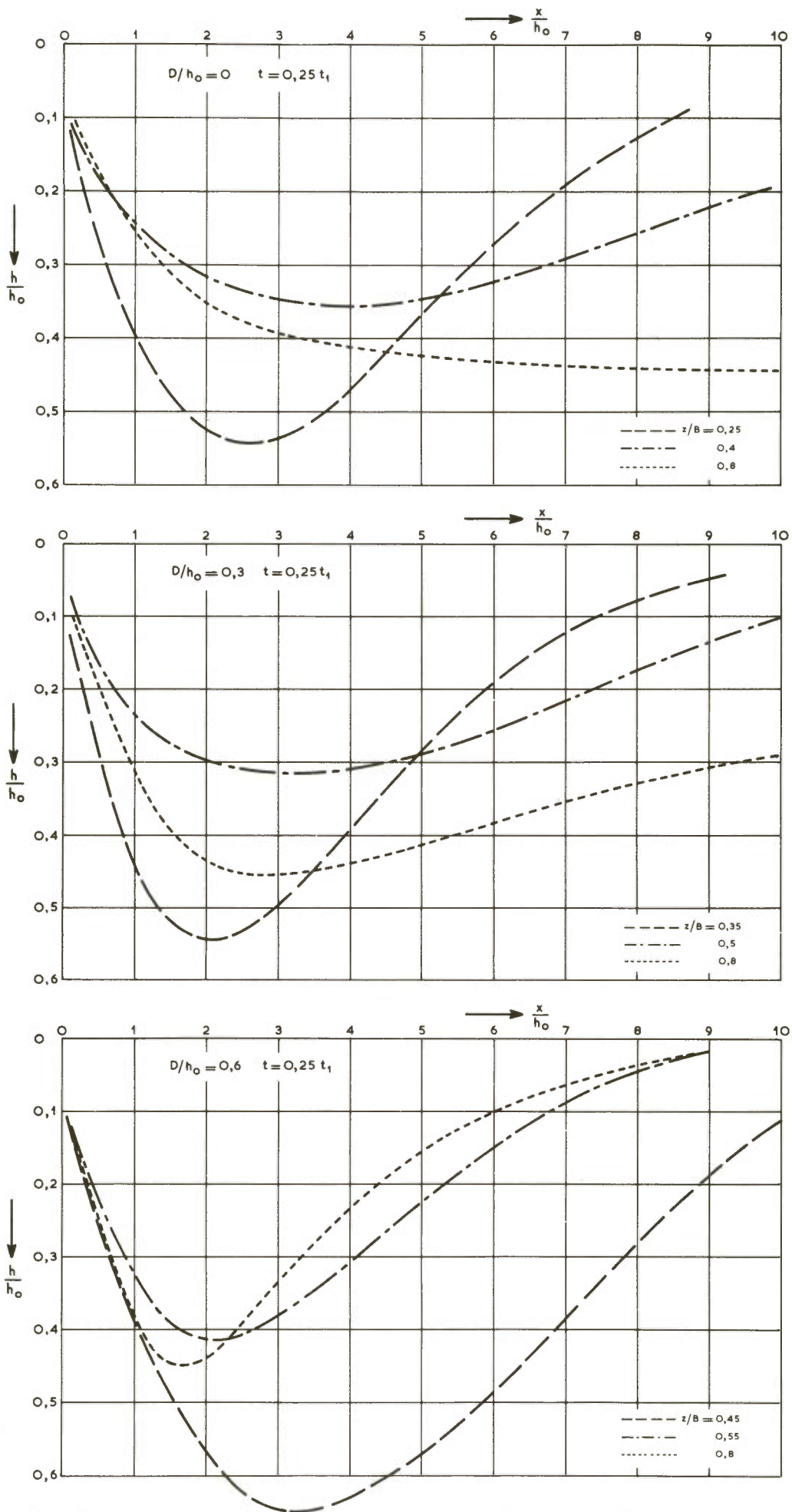
Tenslotte is voor de beoordeling van de ernst van de ontgroning niet alleen de maximale kuildiepte van belang, maar ook de vorm van de ontgrondingskuil en in het bijzonder de steilheid van de aanzethelling. Daarom is naast de hierboven beschreven tijdsontwikkeling van de maximale kuildiepte voor elk van de beschouwde langsraaien het kuilprofiel op één bepaald vergelijkingstijdstip onderzocht. Gekozen is het tijdstip  $t = 0,25 t_1$ , waarop voor de meeste gevallen een peiling voorhanden was en waarop gezien de resultaten van het tweedimensionale ontgrondingsonderzoek (paragraaf 3.3.6.) voor de aanzethelling een evenwichtssituatie mag worden verwacht.

Uitgezocht zijn die peilingen die het dichtst bij het genoemde tijdstip zijn uitgevoerd; vooral bij de kortdurende proeven, waarbij het aantal peilingen in verhouding gering is, moesten nog wel eens vrij grote tijdsafwijkingen worden geaccepteerd, wat uiteraard tot verschillen in de profielen aanleiding geeft. Deze kuilprofielen zijn aangegeven op de bijlagen III-3c t/m 26c; de nummering korrespondeert met die van de bijlagen III-3a t/m 26a en III-3b t/m 26b.

Uit de bijlagen III-3c t/m 26c valt het volgende op te maken. Over het algemeen bestaat tussen de kuilprofielen in één raai bij één geometrie een redelijke mate van gelijkvormigheid, voor zover het het kuilgedeelte tussen aanzet en diepste punt betreft. Bij het gedeelte benedenstrooms van het diepste punt is de spreiding in het algemeen groter, zoals ook gevonden werd bij het tweedimensionale onderzoek, soms zelf zeer groot. Ook hier geldt wat reeds eerder (paragraaf 4.3.4.) over het verschil in nauwkeurigheid tussen twee- en driedimensionaal onderzoek is gezegd: toevoeging van een nieuwe dimensie aan de variatiemogelijkheden gaat onvermijdelijk gepaard met een grotere doorwerking van storingen en meettechnische onvolkomenheden. Dit is vooral het geval bij sterk turbulente stroombeelden, dus in situaties met scherpe zijdelingse beëindigingen en hoge drempels. Bij meer geleidelijke veranderingen in het dwarsprofiel zijn de verstoringen en daarmee de kans op afwijkingen geringer.

De belangrijkste afwijkingen in de kuilprofielen treden op bij de proeven met zand in de F-goot, die ook wat de vorm van de tijdontgrondingslijnen betreft enigszins uit de toon vielen (zie paragraaf 4.3.3.). Kennelijk zijn de afmetingen van de F-goot ( $B = 2,5$  m,  $h_0 = 12,5$  cm) voor ontgrondingen van dit type met zand als bodemmateriaal nog maar nauwelijks toereikend. Daarnaast vertonen ook de proeven met polystyreen-2400  $\mu$ m verscheidene malen een afwijkend beeld, een feit waarvoor geen duidelijke aanleiding kon worden gevonden. Voor het overige zijn, evenmin als bij de tweedimensionale ontgrondingen, systematische invloeden van stroom, materiaal of gootafmetingen op aanzethelling of kuilvorm tot aan het diepste punt te onderkennen.

Van de diverse vormen van de kuilprofielen geeft figuur 46 een samenvattend overzicht. Hieruit is duidelijk te zien hoe bij driedimensionale ontgrondingen de kuilvorm met de plaats in het dwarsprofiel kan variëren. De wervelstraatkuilen, bij de drie geometrieën respectievelijk vertegenwoordigd door de raaien  $z/B = 0,25$ ,  $0,35$  en  $0,45$ , zijn kort en diep met steile aanzethellingen en vertonen overeenkomst met de in het tweedimensionale onderzoek gevonden kuilen achter hoge drempels. Dit valt direct te konstaten uit de onderste drie profielen, die behoren bij de toestand met  $D/h_0 = 0,6$  en die, afgezien van de absolute grootte, onderling veel



Figuur 46. Kuilvormen op diverse plaatsen in het dwarsprofiel.



gelijkenis vertonen. Van onder naar boven gaande wordt deze gelijkenis steeds minder, doordat in het tweedimensionaal verwante gebied (raaien  $z/B = 0,8$ ) de ontgrondingskuil bij afnemende drempelhoogte een steeds langgerekttere vorm krijgt in combinatie met een steeds flauwere aanzehelling, precies zoals dat uit de proeven van het M 648-onderzoek werd gevonden (zie figuur 27) en hier dus opnieuw wordt bevestigd. De profielen uit de tussenliggende raaien ( $z/B = 0,4$  respectievelijk  $0,5$  en  $0,55$ ) laten overgangsvormen zien; zij worden bovendien gekenmerkt door hun op het beschouwde tijdstip  $t = 0,25 t_1$  nog betrekkelijk weinig ver gevorderde ontwikkeling. Dit laatste hangt samen met het feit, dat deze raaien pas in een later stadium van het ontgrondingsproces binnen de invloedssfeer van de wervelstraat komen te liggen en dan juist een extra snelle uitschuring te zien geven, zoals ook uit het verloop van de betreffende tijdontgrondingslijnen voor het diepste punt van deze kuilen (figuren 43 t/m 45) is af te leiden.

Behalve als konsekwentie van de in dwarsrichting variërende tijdschaal blijkt ook uit de hierboven getoonde plaatsafhankelijkheid van tijdontgrondingsrelatie en kuilvorm de noodzaak, om driedimensionale ontgrondingsbeelden door middel van een opsplitsing in meerdere langsraaien te bestuderen en te analyseren. De keuze van het aantal raaien en de onderlinge afstanden zal men in elk specifiek geval moeten afstemmen op de variatie in de optredende uitschuringen en de nauwkeurigheid, die met het oog op bepaalde risico's wordt verlangd. Dat in gebieden waarin wervelstraten optreden de dichtheid van het raaiensysteem in de meeste gevallen relatief groot zal zijn, ligt voor de hand, gezien de voor een dergelijk gebied karakteristieke combinatie van snelle ontgraving en grondmechanisch ongunstige kuilvorm.

## 5. Samenvatting van de resultaten

### 5.1. Kenmerkende grootheden voor plaatselijke ontgroningen

Bij de beschrijving van het driedimensionale ontgrondingsonderzoek in hoofdstuk 4 kon herhaaldelijk worden verwezen naar het in hoofdstuk 3 beschreven tweedimensionale onderzoek. De resultaten van beide onderzoeken blijken dan ook op vele punten grote overeenkomst te vertonen. Anderzijds zijn uit de proeven nergens aanwijzingen gevonden, dat tussen ontgroningen tengevolge van een gelijkmatig verdeelde stroom en die tengevolge van wervelstraten principiële verschillen bestaan, die een geheel verschillende benadering noodzakelijk zouden maken. De konklusie is veeleer, dat men in beide gevallen met één en hetzelfde proces te maken heeft, waarbij uiteraard de verschillen in randvoorwaarden zich in de uitkomsten manifesteren. De scheiding in tweedimensionale en driedimensionale ontgroningen heeft dus niet zozeer een fysische betekenis, maar is meer een aanduiding voor de graad van complexiteit van het probleem: in feite kan men de tweedimensionale toestand als een bijzonder geval beschouwen van het meer algemene driedimensionale verschijnsel.

De gelijke behandeling van twee- en driedimensionale ontgroningen wordt bovendien in de hand gewerkt door het feit dat het driedimensionale ontgrondingsproces, als gevolg van de variatie van de kenmerkende grootheden in de richting dwars op de stroom, per langsraai moet worden bekeken. Bij de analyse van de meetresultaten wordt het driedimensionale proces zodoende als een samenstel van een serie naast elkaar liggende twee-dimensionale situaties geïnterpreteerd. Deze werkwijze, in zekere zin door het verschijnsel zelf opgelegd, blijkt voor het toegepaste ontgrondingsonderzoek tevens een zeer doelmatige te zijn, doordat men vrij is in elke gegeven situatie die langsraaien te selekteren, waarin men het meest is geïnteresseerd.

Voor elk van de beschouwde raaien (bij een zuiver tweedimensionaal geval is één raai voldoende) dient men de ontgroning nu op zodanige wijze te karakteriseren, dat aan de hand van de meetgegevens de ernst van de bodemaantasting beoordeeld kan worden. De ernst van een ontgroning wordt afgemeten naar het risico van stabiliteitsverlies van oevers en konstrukties dat er door wordt veroorzaakt. Dit risico is afhankelijk van de vorm van de ontgrondingskuil en het tempo waarin deze zich ontwikkelt. Kenmerkend voor de vorm van de ontgrondingskuil zijn de grootheden  $h_{\max}$  (= maximale kuildiepte) en  $\cotg \beta$  (= aanzethelling), waarmee het kuilprofiel op de in figuur 1 aangegeven (grondmechanisch veilige) wijze is te schematiseren. Kenmerkend voor de ontwikkeling van de ontgrondingskuil met de

tijd is de grootheid  $t_1$ , respektievelijk  $t_{1/2}$  (= ontgrondingstijd waarin  $h_{\max}$  gelijk wordt aan de oorspronkelijke waterdiepte  $h_o$ , respektievelijk aan de helft daarvan), in combinatie met het verloop van de tijdontgrondingslijn; hierdoor wordt het tempo van het ontgrondingsproces bepaald. De modelwaarden van deze kenmerkende grootheden zijn rechtstreeks uit de peilingen af te leiden. Hieruit kunnen met behulp van de betreffende schaalfactoren de prototypewaarden worden berekend.

## 5.2. Tijdsafhankelijkheid

De tijdsafhankelijkheid van de maximale kuil diepte kan worden uitgedrukt in de relatie

$$\frac{h_{\max}}{h_o} = f_1 \left( \frac{t}{t_1} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{h_{\max}}{h_o} = f_2 \left( \frac{t}{t_{1/2}} \right) \quad (5.2)$$

De functies  $f_1$  en  $f_2$  zijn onafhankelijk van de schaal waarop het ontgrondingsproces zich afspeelt en dus voor model en prototype dezelfde. In het algemene driedimensionale geval blijken deze functies te worden beïnvloed door de geometrische situatie en (ook als geometrie-ïnvloed te beschouwen) door de plaats in het dwarsprofiel. Een algemeen geldende analytische formulering van de relaties (5.1.) en (5.2.) is dientengevolge niet mogelijk. Omdat het functieverband bij elke geometrie voor elke plaats in het dwarsprofiel dus toch experimenteel moet worden afgeleid, heeft nadere specificatie van (5.1.) en (5.2.) weinig zin, maar ligt het daarentegen voor de hand het verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd in grafische vorm aan te geven. Wordt hiervoor een dubbellogaritmische schaalverdeling gebruikt, dan vindt vermenigvuldiging van de ontgrondingsdiepten met de diepteschaal  $n_h$  of van de ontgrondingstijden met de tijdschaal  $n_t$  meetkundig zijn weerslag in een verplaatsing van alle meetpunten over een vaste afstand in de richting van respektievelijk diepte-as of tijd-as. De grafiek ondergaat dan in zijn geheel een translatie in de betreffende richting; de vorm van de tijdontgrondingsrelatie blijft daarbij onveranderd.

In het bijzondere geval van een tweedimensionaal stroombeeld blijkt de geometrie-afhankelijkheid van de tijdontgrondingsrelatie te vervallen, en geldt voor



het verband tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd algemeen de exponentiële betrekking:

$$\frac{h_{\max}}{h_0} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0,38} \quad (5.3.)$$

waarin desgewenst  $t_1$  weer door  $t_1/2$  kan worden vervangen. Voor grote ontgrondingsdiepten ( $h_{\max} > h_0$ ) lijkt een tendens te bespeuren tot afname van de exponent, zodat de geldigheid van relatie (5.3.) in dat opzicht vermoedelijk wel aan beperkingen gebonden is. Te ver gaande extrapolatie kan dan tot te grote ontgrondingsdiepten leiden.

De tijdsafhankelijkheid van de aanzethelling  $\cotg \beta$  is slechts van relatief korte duur: al vrij spoedig na het op gang komen van het ontgrondingsproces (tijdsorde  $0,1 t_1$ ) wordt in het meest bovenstroomse kuilgedeelte kennelijk een evenwichtssituatie bereikt, waarbij de aanzethelling zich stabiliseert. Voor de beoordeling van de ontgroning kan deze ondergeschikte tijdsafhankelijkheid dan ook buiten beschouwing worden gelaten en met de bepaling van de evenwichtshelling worden volstaan.

### 5.3. Afhankelijkheid van de geometrie

De lokale geometrie van het stroombed, inclusief aard en afmetingen van de bodemverdediging en een eventuele, in een bepaalde staat van opbouw verkerende drempelconstructie, beïnvloedt de ontgrondingen in verschillende opzichten. Zowel het tempo van het ontgrondingsproces als ook de vorm van de ontgrondingskuil worden hierdoor in belangrijke mate bepaald. De wijze waarop en de mate waarin zijn echter niet eenduidig uit de diverse geometrische verhoudingen af te leiden. Dit is de reden waarom het in het algemeen niet mogelijk is plaatselijke ontgrondingen rekenenderwijs uit de gegeven randkondities te bepalen, maar voor een redelijk betrouwbare uitspraak over de te verwachten uitschuring modelonderzoek een noodzaak is. Wel zijn in kwalitatieve zin verschillende wetmatigheden voor de geometrie-involed te onderkennen, die als richtlijnen bij het ontwerpen van bodembeschermingen of afsluitingswerken waardevol kunnen zijn.

De invloed van de geometrie op het tempo van het ontgrondingsproces komt tot uiting in de getalwaarde van de coëfficiënt  $\alpha$ , die mede de grootte van de ont-

grondingstijd  $t_1$  (of  $t_{1/2}$ ) bepaalt; bij driedimensionale ontgrondingen bovendien in het verloop van de in de voorgaande paragraaf genoemde functies  $f_1$  en  $f_2$ , die het verband aangeven tussen maximale kuildiepte en tijd. De grootte  $\alpha$ , waarin de invloeden van turbulentie en snelheidsverdeling zijn verdisconteerd, is te beschouwen als maat voor de werkzaamheid van een stroom met snelheid  $\bar{u}$ . Achter hoge drempels en in de invloedsgebieden van wervelstraten neemt  $\alpha$  hoge waarden aan, terwijl een regelmatige geometrie zonder sterke diskontinuiteiten tot lage  $\alpha$ -waarden aanleiding geeft, welk verschil duidelijk met de verschillen in turbulentie-intensiteit samenhangt. Voorts blijkt  $\alpha$  bij een gladde bodem iets groter te zijn dan bij (matig) ruwe verdedigingen, een effect dat uit het verschil in verticale snelheidsverdeling is te verklaren. Het verloop van de tijdontgrondingsrelatie wordt in die zin door de geometrie beïnvloed, dat de toename van  $h_{\max}$  bij wervelstraatkuilen in het begin van het proces duidelijk sneller gaat dan bij meer tweedimensionaal verwante ontgrondingen, welk verschijnsel door de aanwezigheid van een drempel nog wordt versterkt.

Voor de invloed van de geometrie op de vorm van de ontgrondingskuil is het meest relevant de getalwaarde van  $\cotg \beta$ , die de steilheid van de aanzethelling aangeeft. Hoe kleiner  $\cotg \beta$ , des te steiler de helling. Lage waarden van  $\cotg \beta$  worden gevonden bij de geprononceerde ontgrondingskuilen achter hoge drempels en in wervelstraatgebieden; met de hier optredende steile aanzethellingen gaat een puntig en relatief kort kuilprofiel gepaard. Hetzelfde geldt, zij het iets minder sterk, voor situaties met een gladde bodem. Neemt de bodemruwheid toe of de drempelhoogte af, dan wordt bij afwezigheid van sterke wervelaktiviteit het ontgrondingsprofiel meer langgerekt van vorm en krijgt de aanzethelling een flauwer beloop; ofwel, de waarde van  $\cotg \beta$  neemt toe.

Uit het bovenstaande valt te konkluderen, dat de twee manieren waarop de geometrie invloed uitoefent op de ontgroning steeds dezelfde kant op werken, hetzij gunstig, hetzij ongunstig. In die situaties waarin het ontgroningstempo relatief hoog is, dus in relatief korte tijd een grote ontgrondingsdiepte bereikt wordt, is bovendien de aanzethelling van de ontgrondingskuil steil. Ook het tegenovergestelde geldt. In het eerste geval is de kans op instabiliteitsverschijnselen dus in twee opzichten groter dan in het laatste. Hierdoor is het mogelijk een ondubbelzinnig onderscheid te maken tussen gunstiger en ongunstiger geometrische situaties, iets waarmee bij de vormgeving van uit te voeren werken rekening kan worden gehouden.

#### 5.4. Afhankelijkheid van stroom en bodemateriaal

De invloed van de stroom op het ontgrondingsproces is uiteraard nauw verbonden met die van de geometrie, daar het stroombeeld immers in hoofdzaak door de geometrie van het bed wordt bepaald. Feitelijk is het zo, dat de in de vorige paragraaf samengevatte effecten van de geometrie op vorm en tempo van de ontgroning pas tot stand komen door bemiddeling van de stroom, die, gestructureerd door de geometrie, inwerkt op de bodem en deze in zijn oorspronkelijke vorm aantast. Deze verbondenheid tussen stroom en geometrie komt tot uitdrukking in de relatie tussen de stroomsnelheid en de kenmerkende grootte  $t_1$  (of  $t_{1/2}$ ):

$$t_1 \sim (\bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (5.4.)$$

waarin  $\bar{u}$  terwille van de eenduidigheid en vergelijkbaarheid gedefinieerd is als  $Q/Bh_0$ . Met  $\bar{u}$  wordt dus zuiver een vergelijkingsgrootte ingevoerd, karakteristiek voor de sterkte van de stroom, maar overigens ongenueanceerd. De differentiatie naar aanstroomcondities en plaats in het dwarsprofiel gebeurt niet door introductie van specifieke turbulentie- of stroomverdelingsfactoren - dit blijkt namelijk niet op bevredigende wijze mogelijk - maar is ongespecificeerd ondergebracht in de variatie van de coëfficiënt  $\alpha$ . Op deze betekenis van de grootte  $\alpha$  is ook in de vorige paragraaf reeds gewezen.

Zoals uit de betrekking (5.4.) is te zien, is de snelheidsinvloed op de ontgroning ook direkt gekoppeld aan de eigenschappen van het bodemateriaal. Niet de (met  $\alpha$  vergrote) stroomsnelheid op zich blijkt namelijk bepalend voor het ontgrondingsproces, maar de mate waarin deze de grenswaarde, waarbij materiaaltransport juist begint op te treden, overtreft. Deze grenswaarde, de zogenaamde kritieke snelheid, is daarbij gedefinieerd volgens

$$u_{kr} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot u_{*kr} \quad (5.5.)$$

waarin  $\lambda$  met behulp van het diagram van Moody (figuur 11) en  $u_{*kr}$  met behulp van het aangepaste diagram van Shields (figuur 18) uit de stroom- en materiaal-grootheden is af te leiden.

In de uitdrukking  $(\bar{u} - u_{kr})$  blijkt de invloed van de korreldiameter van het bodemateriaal op het tempo van het ontgrondingsproces volledig verdisconteerd



te zijn. Deze materiaalgrootheid behoeft dus niet nog eens expliciet ingevoerd te worden. Wel is dat het geval met de grootheid  $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ , waarmee de relatieve dichtheid van het bodemmateriaal onder water wordt aangegeven. De invloed hiervan op de ontgrondingstijd volgt uit de evenredigheid

$$t_1 \sim \Delta^{1,7} \quad (5.6.)$$

eveneens geldig bij gebruik van de tijd  $t_{1/2}$ .

Ook de invloed van de waterdiepte op het tempo van het ontgrondingsproces blijkt uit te drukken in een exponentiële relatie, en wel geldt voor de kenmerkende ontgrondingstijd  $t_1$  (of  $t_{1/2}$ ):

$$t_1 \sim h_o^2 \quad (5.7.)$$

waarin  $h_o$  de oorspronkelijke waterdiepte voorstelt, gemeten direkt benedenstrooms van het einde van de bodemverdediging. Wegens de geometrische gelijkvormigheid die bij het uitvoeren van ontgrondingsproeven op schaal tussen model en prototype moet bestaan, kan de waterdiepte  $h_o$  tevens als vergelijkingsmaat dienen voor alle voorkomende lengteafmetingen. Dientengevolge is door (5.7.) tevens het verband tussen tijdschaal en lengteschaal van plaatselijke ontgrondingen vastgelegd.

Noch waterdiepte of gemiddelde stroomsnelheid, noch korreldiameter of dichtheid van het bodemmateriaal beïnvloeden het verloop van de relatie tussen maximale ontgrondingsdiepte en tijd, in de betrekkingen (5.1.) en (5.2.) gesymboliseerd door de functies  $f_1$  en  $f_2$ . Door deze onafhankelijkheid van de tijdontgrondingsrelatie van stroom- en materiaalkondities is het mogelijk, voor het diepste punt van de ontgrondingskuil een tijdschaal te definiëren die onveranderlijk en dus eenduidig is gedurende het gehele ontgrondingsproces. Ook de vorm van de ontgrondingskuil - en in het bijzonder de kuilvorm bovenstrooms van het diepste punt - blijkt onafhankelijk te zijn van bovengenoemde stroom- en materiaalkenmerken. Hierdoor is het mogelijk, de voor het diepste punt gedefiniëerde tijdschaal te betrekken op het gehele kuilprofiel, zodat deze tijdschaal ook ten opzichte van de plaats in het lengteprofiel van de ontgrondingskuil invariant is. Ten opzichte van de plaats in het dwarsprofiel geldt deze invariantie van de tijdschaal alleen bij tweedimensionale situaties; in driedimensionale situaties met in dwarsrichting variërende stroomsnelheid en waterdiepte is dit wegens relatie (5.4.) in combinatie met (5.5.) niet te realiseren.

Afwijkingen van de hierboven genoemde wetmatigheden zijn gekonstateerd bij de M 648-proeven met het fijnste zand ( $d = 120 \mu\text{m}$ ) en bij de M 863-proeven met zand in de F-goot, waarbij zowel kuilprofiel als tijdontgrondingslijn enigszins uit de toon vielen door hun afwijkende vorm ten opzichte van de overige meetresultaten bij dezelfde geometrie. Bij het zand- $120 \mu\text{m}$  speelt vermoedelijk het relatief grote suspensietransport een rol, waarvoor de verhouding  $u'/w$  of, bij een bepaalde geometrie,  $\bar{u}/w$  een indicatie geeft; blijkens de tabel van paragraaf 3.3.6. neemt dit materiaal in dit opzicht onmiskenbaar een uitzonderingspositie in. Bij de zandproeven in de F-goot bestond de indruk, dat met de beschikbare waterdiepte van  $h_o = 12,5 \text{ cm}$  voor een behoorlijke reproductie van het proces met het betreffende materiaal ( $\Delta = 1,65$ ,  $d = 185 \text{ à } 210 \mu\text{m}$ ) een ondergrens was bereikt. Naast bovengenoemde afwijkingen werd bij de proeven met bakeliet in een aantal gevallen in de tijdontgrondingsrelatie een zekere tendens tot achterblijven van de ontgronding gekonstateerd, tot uiting komend in een wat eerder afbuigen naar de evenwichtsituatie. De oorzaak hiervan is niet opgehelderd.

Voor het ontgrondingsprofiel benedenstrooms van het diepste punt is een lichte maar systematische invloed van de korreldiameter op de kuilvorm gevonden, in die zin dat met toenemende korrelgrootte een geringere uitschuring gepaard gaat (zie figuur 25). Dit is te verklaren als gevolg van de met de korreldiameter toenemende valsnelheid, waardoor het grovere materiaal in het gebied waar de turbulentie minder overheersend is, sneller tot bezinking komt dan het fijnere. Hier vindt de gelijkvormigheid van de ontgrondingskuilen dus een begrenzing, die voor de praktijk echter weinig bezwaren oplevert, daar uit grondmechanisch oogpunt de vorm van de kuilaanzet maatgevend is.

### 5.5. Reikwijdte en geldigheid van de uitkomsten

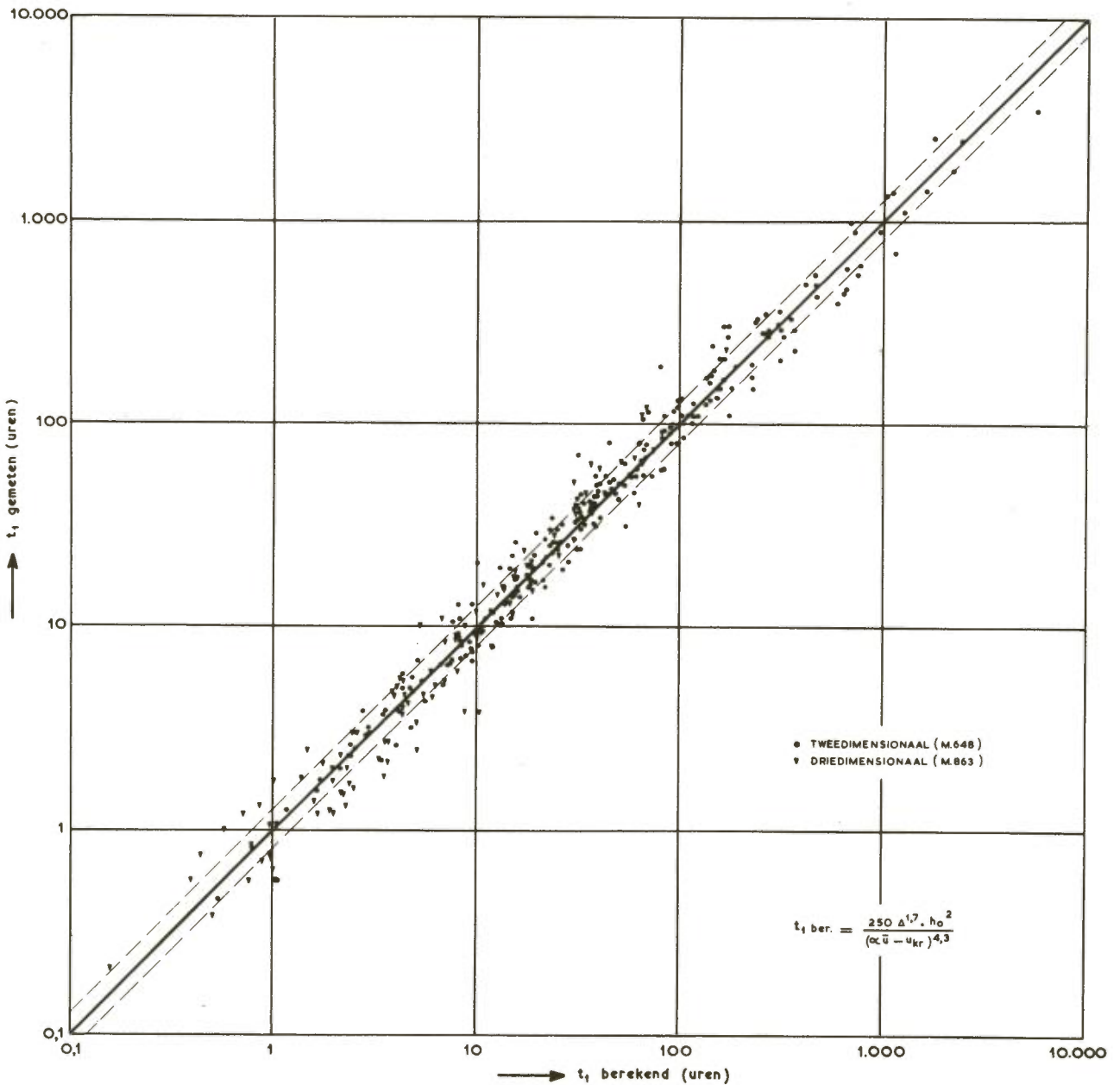
Voegt men de in de vorige paragraaf aangegeven evenredigheden samen, dan blijkt de verkregen betrekking tussen de kenmerkende ontgroningstijd en de stroom- en materiaalgrootheden voor alle 360 onderzochte twee- en driedimensionale gevallen te voldoen, en wel met een en dezelfde evenredigheidsfaktor. De getalwaarde van deze evenredigheidskonstante die bij gebruik van  $t_{1/2}$  een andere is dan bij gebruik van  $t_1$ , is door middel van een optimaliseringsberekening voor de zes grootste proevenseries (130 tweedimensionale + 110 driedimensionale situaties) onder de voorwaarde "één geometrie - één  $\alpha$ " bepaald. Gevonden werd als beste beschrijving van de meetresultaten:

$$t_1 = 250 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (5.8.)$$

en

$$t_{1/2} = 75 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\alpha \bar{u} - u_{kr})^{-4,3} \quad (5.9.)$$

De geldigheid van relatie (5.8.) is in figuur 47 nog eens geïllustreerd door voor het totale proevenpakket de berekende waarden van  $t_1$  uit te zetten tegen de uit de ontgrondingsmetingen afgeleide waarden. De figuur toont dus de resterende spreiding na optimalisering van de koëfficiënten  $k$  en  $\alpha$ . Voor 62 % van de gevallen geldt  $0,8 t_{1gem} < t_{1ber} < 1,25 t_{1gem}$ , welke grenzen in de figuur met een stippellijn zijn aangegeven. Wegens het verband tussen  $h_{max}$  en  $t$  volgens  $h_{max} \sim t^{0,3 \text{ à } 0,5}$  geven afwijkingen van die orde in de  $t_1$ -waarde tot fouten van minder dan 10 % in de ontgrondingsdiepte aanleiding.



Figuur 47. Korrelatie tussen gemeten en berekende waarde van  $t_1$ .



Vervangt men de absolute waarden van de betreffende grootheden door de verhoudingsgetallen tussen de prototype- en modelwaarden, dan volgt uit bovenstaande betrekkingen de schaalrelatie

$$n_t = n \Delta^{1,7} \cdot n_h^2 \cdot n_{(a\bar{u} - u_{kr})}^{-4,3} \quad (5.10.)$$

die evenals de relaties (5.8.) en (5.9.) algemeen geldig is voor zowel tweedimensionale als driedimensionale plaatselijke ontgrondingen.

De koëfficiënten in de relaties (5.8.) en (5.9.) zijn geen zuivere getallen, maar hebben de dimensie  $[\ell]^{2,3} [t]^{-3,3}$ ; dit volgt direkt uit de dimensievergelijking. Dit feit, dat men als bezwaar tegen de gepresenteerde uitkomsten zou kunnen aanvoeren, is in zekere zin het gevolg van het empirisch karakter van het onderzoek en het gebrek aan theoretisch fundament. In literatuur [2] wordt veel aandacht besteed aan de dimensiezuiverheid van de ontgrondingsrelaties. Uitgaande van een dimensie-analyse wordt een verband geformuleerd tussen een aantal als karakteristiek beschouwde dimensieloze groepen, waarvan vervolgens echter sommige bij gebrek aan verifikatiegegevens weer als invloedsfactoren worden geschrapt. Dat hierin het gevaar schuilt mede invloeden te verwaarlozen die wel degelijk een rol spelen, is duidelijk en blijkt dan ook uit het resultaat, dat op een bepaald punt met de feiten in strijd komt. In dat geval is de dimensiezuiverheid wel duur gekocht en lijkt de empirische werkwijze, met de konsekwenties daarvan, toch de voorkeur te verdienen.

Ook in literatuur [10] wordt deze dimensiekwestie besproken. De afgeleide  $t_1$ -relatie vertoont grote overeenkomst met (5.8.), verschilt daarvan alleen enigszins in de getalwaarden van koëfficiënt en exponenten, maar is evenmin dimensiezuiver. Toch is het dimensiezuiver maken in principe niet zo moeilijk, daar men door introductie van de twee grootheden  $\nu$  (kinematische viscositeit  $[m^2/s]$ ) en  $g$  (versnelling van de zwaartekracht  $[m/s^2]$ ) de zaak rond kan krijgen. Daarbij is het zeker niet onaannemelijk dat deze beide grootheden het ontgrondingsproces zullen beïnvloeden; of deze invloed inderdaad zodanig is als uit de dimensievergelijking zou volgen, is echter (nog) niet geverifieerd en dus (nog) speculatie.

Ter afronding van deze discussie wordt hier nog vermeld waartoe genoemde speculatie leidt:

$$\begin{aligned} \text{voor de invloed van de viscositeit:} \quad t_1 &\sim \nu^{0,43} \\ \text{voor de invloed van de zwaartekracht:} \quad t_1 &\sim g^{1,43} \end{aligned}$$

Deze uitkomst is in zoverre zinvol, dat de gevonden tendens overeenstemt met wat

op grond van redenering zou worden verwacht: zowel met toenemende viskositeit (minder ontwikkelde turbulentie) als met toenemende zwaartekracht (zwaardere korrels) zou  $t_1$  toenemen en het ontgrondingsproces dus trager verlopen. Wordt voor de omstandigheden waaronder de proeven zijn uitgevoerd als representatief aangehouden  $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  dan zouden de relaties (5.8.) en (5.9.) op grond van het bovenstaande overgaan in:

$$t_1 = 3333 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\bar{a}u - u_{kr})^{-4,3} \cdot \nu^{0,43} \cdot g^{1,43} \quad (5.11.)$$

en

$$t_{1/2} = 1000 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 \cdot (\bar{a}u - u_{kr})^{-4,3} \cdot \nu^{0,43} \cdot g^{1,43} \quad (5.12.)$$

waarin de getallen 3333 en 1000 dimensieloze koëfficiënten zouden zijn.

*Kloft met v.l. en sec. dan elkaar.*

De geldigheid van de empirisch afgeleide ontgrondingsrelaties wordt beperkt door de veronderstellingen, waaronder het onderzoek is uitgevoerd en de voorwaarden die tijdens het onderzoek zijn gesteld. Als zodanig moet in herinnering worden gebracht de voorwaarde van een voldoende groot materiaaltransport, nodig voor het verkrijgen van gelijkvormige ontgrondingskuilen. Deze voorwaarde kan worden geformuleerd als  $u \gg u_{kr}$ , of misschien beter nog als  $\bar{a}u \gg u_{kr}$ . Dat in ieder geval moet gelden  $\bar{a}u \gg u_{kr}$  volgt direkt uit de relaties (5.8.) en (5.9.); dit is echter nog niet geheel voldoende daar bij te kleine waarden van  $(\bar{a}u - u_{kr})$  het ontgrondingsproces zich niet behoorlijk kan ontwikkelen.

Als tweede voorwaarde moet worden genoemd de afwezigheid van schietend water, voorzover deze stroomtoestand ook bij het prototype afwezig is. Dit dient vooral bij hoge drempels een punt van aandacht te zijn, aangezien op die plaatsen de kans van optreden het grootst is, wanneer ten behoeve van voldoende materiaaltransport de snelheidsschaal ten opzichte van de Froude-schaal wordt overdreven. Controle kan geschieden door voor de situatie boven de drempel na te gaan of voldaan is aan de voorwaarde  $u < \sqrt{gh}$ .

Ten derde is het van belang bij de keuze van stroomsnelheid en bodem-materiaal te letten op de getalwaarde van de grootheid  $\bar{u}/w$ : de afwijkende resultaten met het fijne zand-120  $\mu\text{m}$  doen namelijk vermoeden, dat voor een bevredigende overeenkomst in kuilvorm en tijd-ontgrondingslijn dit verhoudingsgetal aan een bepaald maximum moet worden gebonden. Op grond van het beschikbare onderzoekmateriaal zou deze grenswaarde voorlopig op  $\bar{u}/w < 30$  à 40 kunnen worden gesteld; het is echter zeer wel mogelijk, dat bij nader onderzoek een andere formulering voor deze voorwaarde beter zal blijken te voldoen.

Voor de toepasbaarheid van de resultaten van het systematisch onderzoek worden de volgende omstandigheden verondersteld: een vlakke horizontale uitgangsbodem bestaande uit los korrelvormig materiaal met vrijwel geen of slechts geringe gradering, een permanente waterbeweging bovenstrooms van de ontgrondingskuil, afwezigheid van materiaalaanvoer uit het bovenstroomse gebied naar de plaats van de ontgraving. Dit zijn namelijk de omstandigheden die bij het onderzoek als uitgangspunt zijn aangehouden, zodat de geldigheid van de resultaten in eerste instantie hiertoe is beperkt. In hoeverre deze beperkingen opgeheven kunnen worden en de onderzoekresultaten ook op andere in de natuur voorkomende omstandigheden kunnen worden betrokken, zal in het volgende hoofdstuk nog nader worden gezien.



## 6. Beschouwing van de beperkingen

### 6.1. Weinig gegradeerd loskorrelig bodemmateriaal

Het verrichte ontgrondingsonderzoek is uitgevoerd met niet-kohesieve bodemmateriaal waarvan de meeste een relatief geringe spreiding in de korrelafmetingen vertoonden; sommige van de gebruikte materialen bezaten zelfs een vrijwel uniforme korrelverdeling (zie de bijlagen II-2 en III-2). Deze materiaalkeuze is bepaald door het toepassingsgebied waarvoor het ontgrondingsonderzoek in eerste instantie is ontwikkeld: de afsluitingswerken in de zeearmen van het Deltagebied. Ter plaatse bestaat de bodem uit weinig gegradeerd zand.

Wat het niet-kohesief zijn betreft is weinig uitweiding nodig: dit is gewoon een absolute voorwaarde. Het gedrag van kohesief bodemmateriaal wijkt zodanig af van dat van loskorrelige materialen ten aanzien van de inwerking van de stroom, dat beide een geheel afzonderlijke behandeling vragen. Daarbij komt dat kohesie een bijzonder gekompliceerd verschijnsel blijkt te zijn, dat nog lang niet tot in detail is doorgrond en dat bovendien sterk afhankelijk is van de samenstelling van het materiaal in kwestie. In het algemeen kan wel worden gesteld, dat de erosiebestendigheid van kohesieve materialen doorgaans groter is dan van fijnkorrelige kohesievrije materialen. Kleilaagjes van enige afmeting in een zandbodem zullen dus meestal een remmende invloed hebben op de ontgroning.

Wat de gradering betreft kan eveneens met een kort commentaar worden volstaan: de invloed hiervan op de ontgroning is nog een vraagteken. Voorzover tussen de gebruikte materialen in dit opzicht verschillen bestonden is daarvan geen merkbare invloed gekonstateerd. Ook is bekend, dat het begin van beweging en het materiaaltransport door de gradering betrekkelijk weinig wordt beïnvloed, daar de kritieke stroomsnelheid van de fijnere korrels van het mengsel wordt verhoogd door de beschutting die zij van de grovere korrels ondervinden, terwijl voor deze grovere korrels juist een reductie van de kritieke snelheid geldt, doordat zij naar verhouding sterk aan de werking van de stroom zijn blootgesteld. Tot op zekere hoogte is daardoor voor gegradeerd materiaal een zelfde  $u_{kr}$  aan te houden als voor uniform materiaal met korreldiameter  $d = d_{50}$ . Bij materiaalmengsels met een zodanige korrelverdeling dat  $d_{95}/d_5 > 4 \text{ à } 5$  blijkt echter onder bepaalde stroomcondities het zogenaamde pantsereffekt op te treden, waarbij de grofste korrels na uitspoeling van de fijnere frakties een stabiele laag vormen van één korreldiameter dikte, die de bodem tegen verdere uitschuring beschermt. Of een

dergelijk verschijnsel ook optreedt in ontgrondingskuilen met de daarin heersende sterk turbulente stroomtoestand is nog onbekend.

## 6.2. Vlakke horizontale bodem

Bij alle proeven van het systematisch ontgrondingsonderzoek bestond de onbeschermdede bodem in de uitgangstoestand uit een vlak, horizontaal bed. In de natuur zal dit niet altijd het geval zijn. Met name zal in driedimensionale situaties het bodemverloop in dwarsrichting afwijken van het bij de proeven gehanteerde rechthoekige profiel en gekenmerkt worden door hellende oevertaluds met daartussen een stroomgeul of geulenstelsel. Daar bij driedimensionale situaties het ontgrondingsproces toch voor elk punt in het dwarsprofiel afzonderlijk moet worden bekeken, brengt een dergelijke variatie van de waterdiepte in dwarsrichting voor het onderzoek geen komplikaties met zich mee en kunnen de ontgrondingen, zolang in de stroomrichting geen noemenswaardige hellingen van de bodem optreden, in een willekeurig dwarsprofiel op precies dezelfde wijze worden bepaald als hierboven voor een rechthoekig dwarsprofiel is beschreven. Het enige verschil is, dat de waterdiepte  $h_0$  nu niet voor het gehele dwarsprofiel gelijk is maar van langsraai tot langsraai een andere waarde heeft.

Iets moeilijker wordt het wanneer de bodem in de richting van de stroom een initiële helling vertoont. Dan rijst de vraag hoe de maximale ontgrondingsdiepte  $h_{\max}$  moet worden bepaald en wat als oorspronkelijke waterdiepte  $h_0$  moet worden aangehouden. Wat het laatste betreft ligt de definitie " $h_0$  = waterdiepte ter plaatse van het benedenstroomse einde van de bodemverdediging" het meest voor de hand, waarbij men dan wel moet afspreken of in deze referentiediepte de dikte van de bodemverdediging al dan niet is begrepen. Een voorkeur voor het een of het ander lijkt uit theoretisch oogpunt niet aan te geven.

Wat de bepaling van  $h_{\max}$  betreft kan men hetzij de helling van de bodem negeren en de ontgrondingsdiepte meten ten opzichte van het gekozen  $h_0$ -niveau, hetzij het gegeven bodemverloop wel in aanmerking nemen en ten opzichte hiervan de maximale uitschuring opsporen. Hoewel uit praktische overwegingen dikwijls de eerste methode wordt gehanteerd, lijkt de laatste toch het meest reëel. De interpretatie van de meetgegevens wordt daarbij echter wel iets gekompliceerder, daar niet meer algemeen geldt "maximale waterdiepte na uitschuring =  $h_0 + h_{\max}$ ", terwijl bij de schematisatie van de ontgrondingskuil volgens figuur 1 bij elke langsraai de oorspronkelijke bodemligging onder de juiste helling moet worden aangegeven en de berekende  $h_{\max}$  ten opzichte hiervan moet worden uitgezet.

### 6.3. Permanente stroom

Bij de proeven van het systematisch ontgrondingsonderzoek is steeds een konstant debiet ingesteld, waardoor de waterbeweging afgezien van de invloed van de zich ontwikkelde ontgrondingskuil een permanent karakter droeg. Wordt echter de ontgroning veroorzaakt door een niet-permanente stroom zoals bijvoorbeeld bij de afsluiting van zeearmen tengevolge van de getijbeweging het geval zal zijn, dan zijn de voor permanente afgeleide relaties

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = f\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (6.1.)$$

en

$$t_1 = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_0^2}{(\alpha \bar{u} - u_{kr})^{4,3}} \quad (6.2.)$$

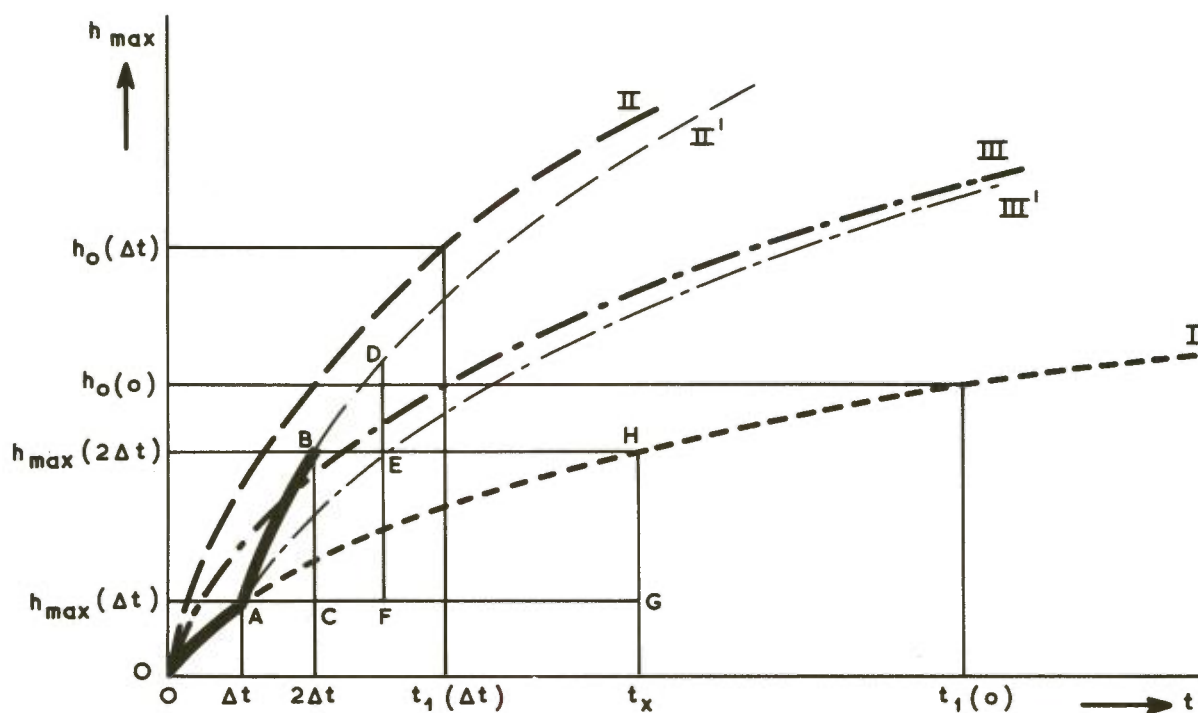
niet zonder meer bruikbaar, daar een aantal bepalende factoren die in het permanente geval een konstante waarde hebben dan veranderlijk worden met de tijd.

De belangrijkste van deze factoren is de gemiddelde snelheid  $\bar{u}$ ; sekundair, maar niettemin van invloed is het tijdsafhankelijk worden van de waterdiepte  $h_0$ . De veranderlijkheid van de kritieke snelheid  $u_{kr}$  is in het algemeen zo gering dat hij te verwaarlozen is. De variatie in de koëfficiënt  $\alpha$  en in de functie  $f$ , samenhangend met een variërende geometrie als gevolg van de variërende waterdiepte, zal gewoonlijk vallen binnen de nauwkeurigheid waarmee  $\alpha$  en  $f$  kunnen worden vastgesteld, zodat het geen zin heeft hierbij een tijdsafhankelijkheid in rekening te brengen.

Beperkt men aldus de tijdsafhankelijkheid tot de grootheden  $\bar{u}$  en  $h_0$ , dan is het mogelijk de relatied (6.1.) en (6.2.) om te werken naar uitdrukkingen voor niet-permanente stroom, onder de veronderstelling dat de niet-permanente beweging opgevat mag worden als een opeenvolging van oneindig kort durende permanente toestanden.

Beschouw daartoe figuur 48, waarin langs de verticale as de maximale ontgrondingsdiepte  $h_{\max}$  en langs de horizontale as de tijd  $t$  is uitgezet, beide volgens lineaire schaal.





Figuur 48. Verloop van  $h_{\max}$  bij stapsgewijs variërende stroomcondities.

Stel dat op het tijdstip  $t = 0$  de ontgroning begint, en aanvankelijk verloopt volgens de willekeurig gekozen tijdontgrondingslijn I (zie figuur), die is gekarakteriseerd door de getalwaarden  $h_o(0)$  en  $t_1(0)$ . Na een tijdsduur  $\Delta t$  is dan een ontgrondingsdiepte bereikt die volgt uit:

$$\frac{h_{\max}(\Delta t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{\Delta t}{t_1(0)} \right\} \quad (6.3.)$$

en is de situatie ontstaan die correspondeert met A in de figuur. Stel dat op dit moment de stroomcondities zodanig veranderen, dat de ontgroning zou verlopen volgens een tijdontgrondingslijn II (zie figuur 48), die is gekarakteriseerd door de getalwaarden  $h_o(\Delta t)$  en  $t_1(\Delta t)$ . Aangezien de ontgroning reeds aan de gang is, zal in werkelijkheid niet de tijdontgrondingslijn II, maar de langs de tijd-as verschoven lijn II' gevolgd worden. Na een tweede tijdsinterval  $\Delta t$  is het ontgrondingsproces dan voortgeschreden tot punt B.

Omdat het weinig praktisch is de ontgrondingsdiepte  $h_{\max}$  te betrekken op een voortdurend variërende waterdiepte  $h_o$ , wordt nu de na  $2 \Delta t$  bereikte ontgrondingsdiepte overgebracht op de oorspronkelijke tijdontgrondingslijn I (punt H), zodat geschreven kan worden:

$$\frac{h_{\max}(2\Delta t)}{h_o(0)} = f \frac{t_x}{t_1(0)} \quad (6.4.)$$

waarin  $t_x$  het met punt H korresponderende tijdstip voorstelt. De grootte van  $t_x$  kan als volgt worden berekend.

Trek tussen de tijdontgrondingslijnen I en II de hulplijn III, gekarakteriseerd door  $h_o(0)$  en  $t_1(\Delta t)$ . Nu geldt:

$$\begin{aligned} \text{voor lijn I:} \quad & \frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{t}{t_1(0)} \right\} \\ \text{voor lijn III:} \quad & \frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{t}{t_1(\Delta t)} \right\} \\ \text{en voor lijn II:} \quad & \frac{h_{\max}(t)}{h_o(\Delta t)} = f \left\{ \frac{t}{t_1(\Delta t)} \right\} \end{aligned}$$

waarin  $f$  steeds hetzelfde funktieverband voorstelt. Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} \text{voor gelijke } h_{\max} \text{ is} \quad & \frac{t_{\text{I}}}{t_{\text{III}}} = \frac{t_1(0)}{t_1(\Delta t)} \\ \text{voor gelijke } t \text{ is} \quad & \frac{h_{\max \text{ II}}}{h_{\max \text{ III}}} = \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \end{aligned}$$

Met dit als gegeven en met behulp van gelijkvormigheidsoverwegingen, geldig mits  $\Delta t$  klein is, is dan te schrijven (zie figuur 48):

$$\left. \begin{aligned} \frac{DF}{EF} &= \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} = \frac{FA}{CA} = \frac{FA}{\Delta t} \\ \frac{GA}{FA} &= \frac{t_1(0)}{t_1(\Delta t)} \end{aligned} \right\} GA = \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{t_1(0)}{t_1(\Delta t)} \cdot \Delta t$$

zodat

$$t_x = \Delta t + GA = \Delta t + \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{t_1(0)}{t_1(\Delta t)} \cdot \Delta t \quad (6.5.)$$

Dit gesubstitueerd in vergelijking (6.4.) levert:

$$\frac{h_{\max}(2\Delta t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{\Delta t}{t_1(0)} + \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(\Delta t)} \right\} \quad (6.6.)$$

Veranderen vervolgens de stroomcondities zodanig, dat het ontgrondingsproces na het bereiken van punt B overgaat op een tijdontgrondingslijn, gekarakteriseerd door de getalwaarden  $h_o(2\Delta t)$  en  $t_1(2\Delta t)$  dan is op analoge wijze af te leiden dat de ontgrondingsdiepte aan het einde van het volgende tijdsinterval bedraagt:

$$\frac{h_{\max}(3\Delta t)}{h_o(0)} = f \frac{\Delta t}{t_1(0)} + \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(\Delta t)} + \frac{h_o(2\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(2\Delta t)} \quad (6.7.)$$

Stelt men nu, ter vereenvoudiging van de schrijfwijze:

$$\frac{h_{\max}(\Delta t)}{h_o(0)} = f \left\{ \tau(\Delta t) \right\}$$

$$\frac{h_{\max}(2\Delta t)}{h_o(0)} = f \left\{ \tau(2\Delta t) \right\}$$

$$\frac{h_{\max}(3\Delta t)}{h_o(0)} = f \left\{ \tau(3\Delta t) \right\}$$



dan is:

$$\begin{aligned}\tau(\Delta t) &= \frac{\Delta t}{t_1(0)} \\ \tau(2\Delta t) &= \tau(\Delta t) + \frac{h_o(\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(\Delta t)} \\ \tau(3\Delta t) &= \tau(2\Delta t) + \frac{h_o(2\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(2\Delta t)}\end{aligned}$$

of algemeen:

$$\tau \left\{ (n+1) \Delta t \right\} = \tau(n\Delta t) + \frac{h_o(n\Delta t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(n\Delta t)} \quad (6.8.)$$

waarin  $n\Delta t$  de totale tijd is, verlopen sinds de ontgraving begon. Vervangen we nu  $n\Delta t$  door de lopende koördinaat  $t$ , dan is (6.8.) als volgt te schrijven:

$$\tau(t + \Delta t) = \tau(t) + \frac{h_o(t)}{h_o(0)} \cdot \frac{\Delta t}{t_1(t)}$$

ofwel:

$$\frac{\tau(t + \Delta t) - \tau(t)}{\Delta t} = \frac{h_o(t)}{h_o(0) \cdot t_1(t)} \quad (6.9.)$$

De limiet van dit differentiequotient voor  $\Delta t \rightarrow 0$  leidt tot

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{h_o(0)} \cdot \frac{h_o(t)}{t_1(t)} \quad (6.10.)$$

waaruit door integratie volgt:

$$\tau(t) = \frac{1}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt + C \quad (6.11.)$$

Bij een niet-permanente waterbeweging vindt men dus voor de maximale ontgrondingsdiepte  $h_{\max}$  op het tijdstip  $t$ :

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \tau(t) \right\} = f \left\{ \frac{1}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt \right\} \quad (6.12.)$$

met  $C = 0$  uit de voorwaarde dat  $h_{\max} = 0$  voor  $t = 0$ .

Bij een permanente beweging volgens de uitgangskondities  $u = u(0)$  en  $h_o = h_o(0)$  zou men volgens (6.1.) vinden:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{t}{t_1(0)} \right\} \quad (6.13.)$$

Om met deze permanente stroom eenzelfde  $h_{\max}$  te bereiken als met de niet-permanente beweging, moet dus

$$\frac{t}{t_1(0)} = \frac{1}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt$$

waaruit een effectieve permanente-stroomduur volgt van:

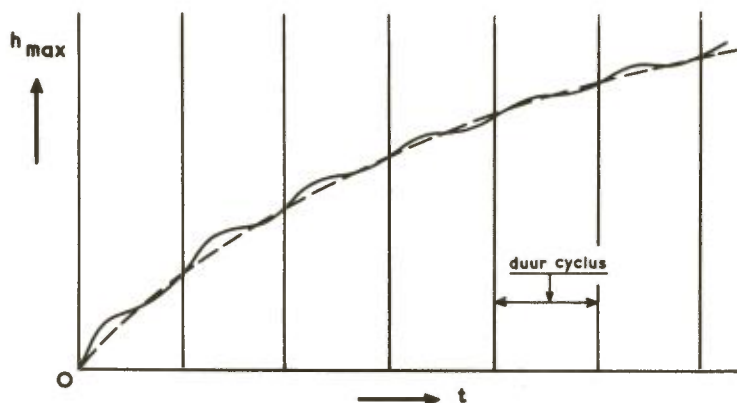
$$t_{\text{eff}} = \frac{t_1(0)}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt \quad (6.14.)$$

De bijbehorende waarde van  $t_1(t)$  volgt uit relatie (6.2.):

$$t_1(t) = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_o(t)^2}{\left\{ \alpha \bar{u}(t) - u_{kr} \right\}^{4,3}} \quad (6.15.)$$

waarin, in overeenstemming met het uitgangspunt, alleen de tijdsafhankelijkheid van de grootheden  $\bar{u}$  en  $h_0$  in aanmerking is genomen.

Doorloopt de niet-permanente stroom een cyclische beweging, wat bij een getijstroom nagenoeg het geval is, dan neemt de ontgrondingsdiepte toe volgens een golfvormig verloop als geschetst in figuur 49.



Figuur 49. Verloop van  $h_{\max}$  bij cyclisch variërende stroomcondities.

Beschouwt men de ontgraving op langere termijn, dan kan men ter vereenvoudiging afzien van het detail-verloop binnen één cyclus en slechts de gemiddelde diepte-toename per cyclus in het oog houden, zoals in figuur 49 met een stippellijn is aangegeven. Deze gemiddelde ontgraving kan men veroorzaakt denken door een permanente stroom, waarvoor men echter de tijdschaal moet afleiden uit de gegevens van de niet-permanente cyclische getijbeweging. Definieert men nu als  $t_{\text{getij}}$  die tijdsduur, waarin onder de betreffende getij-omstandigheden  $h_{\max} = h_0$  wordt en kiest men als vergelijkingswaarde voor  $h_{\max}$  de waterdiepte op het tijdstip  $t = 0$ , dan geldt volgens relatie (6.1.):

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0(0)} = f \left\{ \frac{t}{t_{\text{getij}}} \right\} \quad (6.16.)$$

terwijl de relaties (6.12.) en (6.15.) aangeven hoe de ontgrondingsdiepte afhangt van de variabele grootheden  $\bar{u}$  en  $h_0$ . Combineert men (6.12.) en (6.16.), dan krijgt men:



$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{1}{t_{1\text{getij}}} \right\} = f \left\{ \frac{1}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt \right\}$$

waaruit volgt:

$$t_{1\text{getij}} = \frac{t}{\frac{1}{h_o(0)} \int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt} = \frac{h_o(0) \cdot t}{\int_0^t \frac{h_o(t)}{t_1(t)} dt} \quad (6.17.)$$

met

$$t_1(t) = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_o(t)^2}{\left\{ \bar{a}u(t) - u_{kr} \right\}^{4,3}} \quad (6.15.)$$

Bij een cyclische beweging schommelt de getalwaarde van het rechterlid van relatie (6.17.) om een gemiddelde; deze gemiddelde waarde verkrijgt men door te integreren over één gehele periode, of een veelvoud daarvan. Stelt men de duur van de getijperiode op  $t = T$  en substitueert men nog (6.15.) in (6.17.), dan kan men dus de gemiddelde ontgronding op langere termijn tengevolge van een getijstroom berekenen uit:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o(0)} = f \left\{ \frac{t}{t_{1\text{getij}}} \right\} \quad (6.16.)$$

$$t_{1\text{getij}} = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_o(0)}{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{\left\{ \bar{a}u(t) - u_{kr} \right\}^{4,3}}{h_o(t)} dt} \quad (6.18.)$$

Voor het geval dat slechts gedurende een gedeelte van de getijperiode ontgronding optreedt kan men de bijdrage van het overige deel aan de integraal van relatie (6.18.)

weglaten, of, wat op hetzelfde neerkomt, de integratiegrenzen zodanig kiezen dat alleen die tijd wordt ingesloten waarin ontgronding optreedt.

Indien men de tijdsafhankelijkheid van de waterdiepte  $h_o$  wil verwaarlozen en alleen de variatie van de gemiddelde snelheid  $\bar{u}$  in rekening wil brengen, kunnen de relaties (6.16.) en (6.18.) nog vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_o} = f \left\{ \frac{t}{t_{1\text{getij}}} \right\} \quad (6.19.)$$

$$t_{1\text{getij}} = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2}{\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \alpha \bar{u}(t) - u_{kr} \right\}^{4,3} dt} \quad (6.20.)$$

Bij ontgrondingen in sluitgaten onder normale getij-omstandigheden blijkt deze laatste vereenvoudiging slechts een betrekkelijk geringe afwijking in de uitkomst te veroorzaken.

Op bovenbeschreven wijze is het dus mogelijk ook voor niet-permanente stroomtoestanden het verloop van de maximale ontgrondingsdiepte met de tijd te bepalen. In hoeverre onder dergelijke omstandigheden, bijvoorbeeld bij een heen en weer trekkende getijstroom, ook de kuilvorm en in het bijzonder de aanzetheling gelijk blijft aan die welke bij permanente stroom wordt gevonden, is nog een onbeantwoorde vraag.

#### 6.4. Geen materiaaltransport bovenstrooms

De ontgrondingsproeven van het systematische onderzoek waren zodanig ingericht, dat alleen benedenstrooms van de bodemverdediging transport van bodemmateriaal kon plaatsvinden. Het bovenstroomse bed bestond uit een vaste bodem en het aangevoerde water werd ook niet kunstmatig met bodemmateriaal "gevoed".

Door de stroom werd dus uitsluitend materiaal uit de ontgrondingskuil afgevoerd; aanvoer van bodemmateriaal daar naar toe vanuit het bovenstroomse gebied vond niet plaats.

Onder natuurlijke omstandigheden kan dit anders zijn en zal vooral bij fijnkorrelige bodemmateriaal ook in het aanstromende water reeds materiaal in suspensie zijn. In dat geval is ter plaatse van de ontgroning een deel van de transportcapaciteit van de stroom reeds "bezet", zodat in tegenstelling tot de situatie bij het modelonderzoek niet de volle transportcapaciteit beschikbaar is voor de afvoer van het uit de ontgrondingskuil opgewerkte materiaal. In werkelijkheid kan dan minder materiaal worden opgenomen en zullen de ontgrondingen in verhouding dus kleiner zijn dan in het model. De modelresultaten moeten dan ook op een of andere wijze worden gecorrigeerd.

Deze correctie kan in principe op twee manieren worden gerealiseerd. Ten eerste door ook in het model het optredende materiaaltransport bovenstrooms van de bodemverdediging na te bootsen, wat theoretisch het beste zou zijn maar modeltechnisch op grote bezwaren stuit; ten tweede door voor de te grote uit het model gevonden ontgrondingen een reductie te berekenen, wat weliswaar schematisatie noodzakelijk maakt maar praktisch de meeste perspectieven biedt. Tot nu toe is alleen de tweede correctiemethode toegepast. Voor de bepaling van de reductie van de maximale ontgrondingsdiepte is een berekeningswijze ontwikkeld (zie literatuuropgave [8]), die berust op de volgende gedachtengang.

De inhoud van de in het model gevonden (eventueel naar de vorm geschematiseerde) ontgrondingskuil is evenredig te stellen met het kwadraat van de maximale ontgrondingsdiepte (verhouding tussen lengte en diepte van de kuil blijft tijdens het ontgrondingsproces bij benadering konstant, zie figuur 6). Voor een strook van 1 m breed dwars op de stroomrichting kan dan geschreven worden:

$$I(t) = a h_{\max}^2(t) \quad (6.21.)$$

Uit het verloop van  $h_{\max}$  met de tijd volgens de in het model gemeten tijdontgrondingslijn kan nu worden afgeleid, hoeveel materiaal in een zeker tijdsverloop  $t$ , gerekend vanaf het begin van de ontgroning, uit de ontgrondingskuil zou zijn afgevoerd, wanneer de volle transportcapaciteit van de stroom ter beschikking zou hebben gestaan. Wordt het initiële materiaaltransport (de materiaalaanvoer van bovenstrooms) per  $m'$  breedte op  $T$  gesteld, dan is de in werkelijkheid uit de kuil afgevoerde hoeveelheid materiaal gelijk aan



$$I(t)_{\text{gereduceerd}} = I(t) - T \cdot t \quad (6.22.)$$

en dus de werkelijk bereikte maximale ontgrondingsdiepte:

$$h_{\text{max}}(t)_{\text{gereduceerd}} = \sqrt{\frac{I(t) - T \cdot t}{a}} \quad (6.23.)$$

Bij konstante  $T$  neemt de term  $T \cdot t$  lineair toe met de tijd, terwijl de toename van  $I(t)$  aanvankelijk zeer snel maar met het voortgaan van de tijd steeds minder snel verloopt. Op zeker moment zal het verschil  $I(t) - T \cdot t$  een maximale waarde bereiken en is dus

$$\frac{d I(t)}{d t} - T = 0 \quad (6.24.)$$

wat wil zeggen dat de volle transportkapaciteit van de stroom juist gelijk is geworden aan het initiële transport. Er is dan een situatie van evenwicht ingetreden, waarin de ontgroning tot stilstand is gekomen en de kuil, onder de heersende stroomkondities, zijn uiterste diepte heeft bereikt.

Het zal duidelijk zijn dat het effect van de reductie belangrijker wordt, naarmate het ontgrondingsproces trager verloopt, respectievelijk de voor de kuilontwikkeling beschikbare tijd langer is. Zo zijn er situaties denkbaar die zo kort duren of waarbij de ontgroning zo sterk is, dat het reducerende effect van de materiaalaanvoer van bovenstreams zonder meer te verwaarlozen is. Daartegenover kunnen er ook situaties voorkomen, waarbij de berekening tot negatieve waarden van  $I(t)_{\text{gereduceerd}}$  leidt en de reductie dus de ontgroning zou overtreffen: in dat geval wordt de ontgrondingsdiepte imaginair, dat wil zeggen treedt de ontgroning in 't geheel niet op.

Voor de toepassing van deze reductiemethode vormt de vaststelling van het initiële materiaaltransport  $T$  voor de diverse langstraaien in het dwarsprofiel de grootste moeilijkheid. De grootte en de dwarsverdeling van het bovenstroomse materiaaltransport zouden in feite uit metingen in het prototype bepaald moeten worden, wat geen eenvoudige zaak is, terwijl ook dan nog de vraag blijft bestaan, welk deel van dit transport als reducerende faktor voor het ontgrondingsproces effectief is.

In vele gevallen zal men voor T slechts de orde van grootte als gemiddelde waarde kunnen aangeven. Het verdient aanbeveling in dergelijke gevallen de reductieberekening voor een paar verschillende waarden van T uit te voeren, teneinde een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de uitkomsten voor mogelijke afwijkingen en daarmee van de betrouwbaarheid ervan.

### 6.5. Begrensde variatie schaalfactoren

De boven besproken beperkingen van het systematische ontgrondingsonderzoek waren gelegen in de uitwendige omstandigheden waaronder de gevonden wetmatigheden zijn afgeleid. Deze beperkingen bleken voor een deel door specificatie naar plaats of tijd van de betrokken grootheden en door aanvullende rekenmethodes te kunnen worden opgeheven. Van geheel andere aard is de beperking waar hier op wordt gewezen: deze betreft de geldigheid van de onderzoekresultaten als zodanig en wel als gevolg van de begrensde variatie in de relevante parameters zelf.

Het is daarom van belang hier even bij stil te staan, omdat het onderzoek tot doel had schaalregels te formuleren, waarmee de in een model waargenomen ontgrondingsverschijnselen naar het prototype kunnen worden overgebracht. Gezien het empirische karakter van dergelijke schaalregels, hangt de betrouwbaarheid ervan sterk af van de bij het onderzoek toegepaste schaalvariatie. In dit geval betreft dat de variatie in waterdiepte, stroomsnelheid en materiaalkenmerken als bepalende factoren voor de empirische afgeleide tijdschaalrelatie.

De invloed van de materiaalgrootheden  $\Delta$  en  $d$  is over een wijd gebied geverifieerd. Vier dichtheden zijn beproefd, lopend van  $\Delta_{\max} = 1,65$  tot  $\Delta_{\min} = 0,046$ , dus tot een onderlinge verhoudingsfaktor van  $\Delta_{\max}/\Delta_{\min} = 36$ . Ook de korrel diameter is behoorlijk gevarieerd, van minimaal  $120 \mu\text{m}$  tot maximaal  $2600 \mu\text{m}$ , dus in een verhouding van  $d_{\max}/d_{\min} = 22$ . De keuze van het variatiegebied is bovendien zodanig, dat het ook de meest voorkomende prototype-situaties omvat, zodat bij specifiek modelonderzoek in dit opzicht zelden van extrapolatie sprake zal zijn.

De toegepaste stroomsnelheden lopen over het geheel van proeven gezien sterk uiteen: van  $\bar{u} = 5 \text{ cm/s}$  minimaal tot  $\bar{u} = 113 \text{ cm/s}$  maximaal. Per situatie is de variatiemogelijkheid echter beperkt door de keuze van de overige instelcondities: het toegepaste bodemmateriaal ( $\bar{a}\bar{u} \gg u_{kr}$ ) en de kleinste optredende waterdiepte ( $u < \sqrt{gh}$ ). Voor de wijdheid van het variatiegebied is daarom  $\bar{u}$  een minder goede

maatstaf; beter is het hiervoor bijvoorbeeld de grootheid  $\bar{u}/u_{kr}$  te gebruiken. Deze verhouding varieert tussen een maximale waarde van  $\bar{u}/u_{kr} = 3,87$  (serie 14, polystyreen - 1600  $\mu\text{m}$ ,  $h_o = 30$  cm) tot een minimale van  $\bar{u}/u_{kr} = 0,45$  (F-goot, bakeliët - 1700  $\mu\text{m}$ ,  $h_o = 12,5$  cm), in totaal dus een faktor  $3,87/0,45 = 8,6$ . Deze variatie kan als redelijk goed worden beoordeeld, terwijl bovendien de extrapolatie naar het prototype (met  $\bar{u}/u_{kr}$  in de orde 4 à 5) slechts gering is.

Minder gunstig ligt de situatie bij de lengte(= diepte)schaal. Hiervoor zal men in de praktijk al gauw waarden van  $n_l = n_h = 40$  à 80 willen kiezen, terwijl de verhouding tussen maximale en minimale waterdiepte bij het tweedimensionale onderzoek niet verder komt dan een faktor 12 (150 cm : 12,5 cm) en bij het driedimensionale onderzoek slechts een faktor 4 bedraagt (50 cm : 12,5 cm). Bij bovengenoemde schaalkeuze voor de lengteafmetingen ontkomt men er dus niet aan de empirische gevonden invloed van de lengteschaal op de tijdschaal sterk te extrapoleren. Dit is een zwak punt in de resultaten van het systematische onderzoek.

Laatstgenoemde beperking van de onderzoekresultaten is een gevolg van het feit, dat voor ontgrondingsverschijnselen geen metingen op prototypeschaal voorhanden zijn, waaraan de modelresultaten getoetst kunnen worden. Daardoor moet de invloed van de waterdiepte volledig uit modelproeven op verschillende schalen worden afgeleid. Hierbij is men, zoals bij de beschrijving van de proeven al is gememoreerd, aan praktische grenzen gebonden. Het zou daarom de moeite waard zijn en uit wetenschappelijke oogpunt zijn toe te juichen, indien het tot nu toe verrichte systematische onderzoek zou worden aangevuld met een ontgrondingsproef op grote schaal onder vergelijkbare en controleerbare omstandigheden.

Een tweede zwak punt van het onderzoek is de onzekerheid die is blijven bestaan over de mogelijke invloed van een relatief sterk suspensietransport op de ontwikkeling van de ontgrondingskuil en de daaraan gekoppelde voorwaarde voor overeenkomst in de kuilprofielen. Zou de voorlopig gestelde grens van  $\bar{u}/w < 30$  à 40 (zie paragraaf 5.5.) inderdaad het geldigheidsgebied van de onderzoekresultaten afbakenen, dan zou dit voor de toepassing op specifieke gevallen vergaande konsekwenties hebben: daar in vele prototype-situaties genoemde grens namelijk wordt overschreden, zouden dergelijke situaties bijgevolg niet of slechts met verminderde betrouwbaarheid op de hier beschreven wijze in een schaalmodel kunnen worden onderzocht.

Het is duidelijk dat voortgezet onderzoek op dit punt aanbeveling verdient, waarbij de faktor  $\bar{u}/w$  of een andere, voor de omvang van het suspensietransport meer adequate vergelijkingsgrootte systematisch wordt gevarieerd, zodat de eventuele invloed daarvan op het ontgrondingsproces duidelijker kan worden onder-



kend. Hierbij zou het variatiegebied ook representatieve prototype-situaties moeten bestrijken. Voor een dergelijk onderzoek zou bovengenoemde ontgrondingsproef op grote schaal eveneens waardevolle informatie kunnen leveren.

## 7. Toepassingen

### 7.1. Specifiek modelonderzoek

Het doel van het systematische ontgrondingsonderzoek was een methode te ontwikkelen om lokale ontgrondingsverschijnselen te beschrijven en voor bestudering en berekening toegankelijk te maken. In verband met de gekompliceerde aard van het verschijnsel leek een zuiver theoretische benadering weinig perspectief te bieden en is de gestelde opgave gerealiseerd door middel van experimenteel modelonderzoek. Hieruit resulteerden een aantal schaalregels, waarmee in combinatie met aanvullende rekenmethodes de in een model waargenomen ontgrondingen voor de omstandigheden in het prototype kunnen worden geïnterpreteerd. Over de toepassing van deze onderzoekresultaten nog het volgende.

Het ontgrondingsonderzoek is in het bijzonder opgezet met het oog op de afsluitingswerken in het deltagebied. De resultaten kunnen echter zonder meer worden toegepast op elke twee- of driedimensionale situatie, waarbij de ontgroning veroorzaakt wordt door de overgang van een beschermde naar een onbeschermde bodem. Een dergelijke situatie treft men bijvoorbeeld ook aan bij de beeindiging van het stortebed van een spui- of schutsluis. Het is verder bepaald niet uitgesloten dat met de ontwikkelde beschrijvingswijze een nog veel ruimer toepassingsveld kan worden bestreken en de afgeleide relaties, wellicht aangepast of uitgebreid, ook bruikbaar zijn voor ontgrondingen die door andere diskontinuiteiten in het stroombed worden teweeggebracht, zoals de kopeffecten van kribben en strandhoofden of de erosie benedenstrooms van stuwen en overlatten. Dit zou betrekkelijk eenvoudig aan de hand van een paar schaalproeven geverifieerd kunnen worden.

Het ontgrondingsonderzoek is voorts in het bijzonder gericht op problemen waarbij de tijdsafhankelijkheid van het proces een belangrijke rol speelt. Toepassing van de resultaten zal dus vooral in aanmerking komen bij tijdelijke situaties of bij langdurige erosieprocessen, waarvoor de uiteindelijke evenwichtstoestand niet in eerste instantie maatgevend is. Wordt de eindtoestand evenwel sterk beïnvloed door de aanvoer van bodemmateriaal van bovenstrooms, dan kan deze situatie mede binnen het toepassingsgebied van de onderzoekresultaten worden betrokken.

Voor elke situatie waarvoor informatie over de te verwachten ontgrondingen gevraagd wordt is modelonderzoek noodzakelijk. Het model dient geometrisch gelijkvormig te zijn aan het prototype en kan dus niet horizontaal worden samengetrokken. Het modelonderzoek wordt uitgevoerd met permanente stroom; eventuele fluktua-

ties in de stroomtoestand in het prototype worden naderhand bij de uitwerking van de meetgegevens in rekening gebracht. Het model wordt niet met bodemmateriaal "gevoed"; het effect van eventueel in het prototype optredend materiaaltransport bovenstrooms van de ontgrondingskuil wordt door middel van een reductie achteraf zo goed mogelijk benaderd.

Het te gebruiken niet-kohesieve bodemmateriaal moet zodanig worden gekozen, dat bij de in het model in te stellen stroomsnelheden en waterdiepten een redelijke mate van materiaaltransport kan worden verwacht, waarbij in praktisch aanvaardbare ontgrondingstijden meetbare ontgrondingsdiepten worden verkregen. Hiervoor is vaak enige vrijheid in de keuze van de snelheidsschaal onontbeerlijk. Wegens het stromen met permanentie is het mogelijk af te wijken van de snelheidsschaal volgens Froude ( $n_v = \sqrt{n_h}$ ) en de stroomsnelheden ten opzichte hiervan te overdrijven of te onderdrukken. Wel dient hierbij verstoring van het stroombeeld zoveel mogelijk te worden voorkomen daar in verband met de sterke afhankelijkheid van de ontgronding van de stroomsnelheid een goede reproductie van zowel horizontale als verticale snelheidsverdeling van groot belang is. Aan deze voorwaarde is voldaan, indien de veranderingen die tengevolge van de afwijking van de Froudeschaal in de vervallen optreden klein blijven ten opzichte van de waterdiepte, en indien de veranderingen in de waterstanden boven- en benedenstrooms geen noemenswaardige wijzigingen teweegbrengen in de zijdelingse toe- en afstroming. Moet de ontgronding tengevolge van een getijstroom worden onderzocht, dan kan, mits de stroomverdeling gedurende de vloedfase respectievelijk de eb fase niet te zeer varieert, doorgaans met de reproductie van de twee toestanden van maximale stroom worden volstaan. Een zekere concessie aan de exaktheid van het stroombeeld zal daarbij wegens het wegvallen van versnellings(vertragings)verschijnselen en kombergings(komledigings)-stromen meestal wel moeten worden gedaan.

Tijdens de ontgrondingsproeven worden peilingen uitgevoerd op een aantal tijdstippen na het aanzetten van het model. Tevens wordt voorafgaand daaraan de uitgangsbodem opgenomen. Om onnodig grote tijdsverschillen tussen de ontgrondingsmetingen in de punten van één kuilprofiel te vermijden, verdient het aanbeveling de peilingen zo uit te voeren, dat steeds de richting van de langsraaien gevolgd wordt en de diverse te onderzoeken langsraaien dus stuk voor stuk worden afgewerkt. Behalve de ontgrondingsdiepten moeten bij elke proef de  $h_0$ -waarden voor elke langsraai, het totale debiet  $Q$  en de oppervlakte  $A$  van het natte dwarsprofiel op een representatieve plaats worden vastgelegd.

Het verdient voorts aanbeveling elke nieuwe situatie met twee of drie verschillende debieten te onderzoeken, en wel om de volgende redenen:



- het aantal beschikbare waarnemingen wordt wat groter dan bij een enkele proef, waardoor meetonnauwkeurigheden of toevallige afwijkingen in de ontgrondingsprofielen minder effect hebben op de uitkomst en eventuele meetfouten gemakkelijker kunnen worden geëlimineerd;
- zowel op plaatsen met een relatief snelle ontgroning als op plaatsen met een relatief langzame ontgroning komt het verloop van het proces door de differentiatie van de gemiddelde stroomsnelheid beter tot zijn recht;
- bij de verschillende debieten treden in eenzelfde langsvaai in dezelfde tijdsduur verschillende ontgrondingsdiepten op; de proeven leveren dus verschillende stukken van de voor die vaai geldende tijdontgrondingslijn, waardoor het verloop van de functie  $f$  en de waarde van  $t_1$  betrouwbaarder kunnen worden bepaald.

De verwerking van de meetgegevens doorloopt achtereenvolgens de volgende fasen.

Allereerst worden de peilingen uitgewerkt tot langsvaai-profielen van de ontgrondingskuil in de betreffende vaai. Vergelijking van de kuilprofielen met de uitgangsbodem maakt het mogelijk voor elk geval de maximale ontgrondingsdiepte  $h_{\max}$  te bepalen. Voorts leveren de kuilprofielen voor elke langsvaai de voor model en prototype gelijke aanzethelling  $\cotg \beta$ .

Deling van  $h_{\max}$  door de  $h_o$ -waarde van de betreffende vaai en uitzetten van  $h_{\max}/h_o$  tegen de korresponderende ontgroningstijd (= tijdstip peiling minus tijdstip begin proef) levert een aantal punten van de tijdontgrondingslijn voor het betreffende geval. De gevonden punten worden gekombineerd met de overeenkomstige resultaten van de proeven met andere debieten door ze zodanig langs de tijd-as te verschuiven, dat uit alle waarnemingen tezamen zo goed mogelijk één tijdontgrondingsrelatie kan worden vastgesteld. Met de vastgestelde tijdontgrondingslijn wordt voor elke proef het tijdstip opgezocht waarop  $h_{\max}/h_o = 1$  of  $h_{\max}/h_o = 1/2$ , per definitie overeenkomend met de waarde van  $t_1$ -model, respectievelijk  $t_{1/2}$ -model. Met behulp van de  $t_1(t_{1/2})$ -relatie kan nu uit de gevonden  $t_1(t_{1/2})$ -waarden en de bekende grootheden  $\Delta$ ,  $h_o$ ,  $\bar{u}$  en  $u_{kr}$  de grootte van  $a$  worden berekend. Per langsvaai worden de berekende  $a$ -waarden gemiddeld.

De volgende stap is de berekening van de  $t_1(t_{1/2})$ -waarden voor het prototype. Hiervoor dienen de stroom- en materiaalkondities van het prototype bekend te zijn. Bij situaties met getijbeweging moet het verloop van  $\bar{u}$  en  $h_o$  gedurende de vloedfase respectievelijk de ebphase worden vastgesteld, al naar gelang het onderzoek de ontgrondingen tengevolge van de vloedstroom of van de ebstroom betreft. Met de verzamelde gegevens en de van toepassing zijnde formules kan vervolgens voor elke langsvaai de grootte van  $t_1$ -prototype worden berekend. Door combinatie

van  $t_1$ -prototype en  $h_0$ -prototype is één punt van de tijdontgrondingslijn voor het prototype gefixeerd; daar de vorm van deze lijn (bij gebruik van een dubbellogaritmische ondergrond) dezelfde is als gevonden uit de modelmetingen, is de gevraagde betrekking tussen  $h_{\max}$  en  $t$  voor het betreffende geval nu te konstrueren.

In geval reductie van de ontgronding door materiaalvoer van bovenstrooms in aanmerking komt, moet vervolgens het gevonden verloop van  $h_{\max}$  met de tijd nog worden omgewerkt naar een relatie tussen  $h_{\max}$  (gereduceerd) en  $t$ .

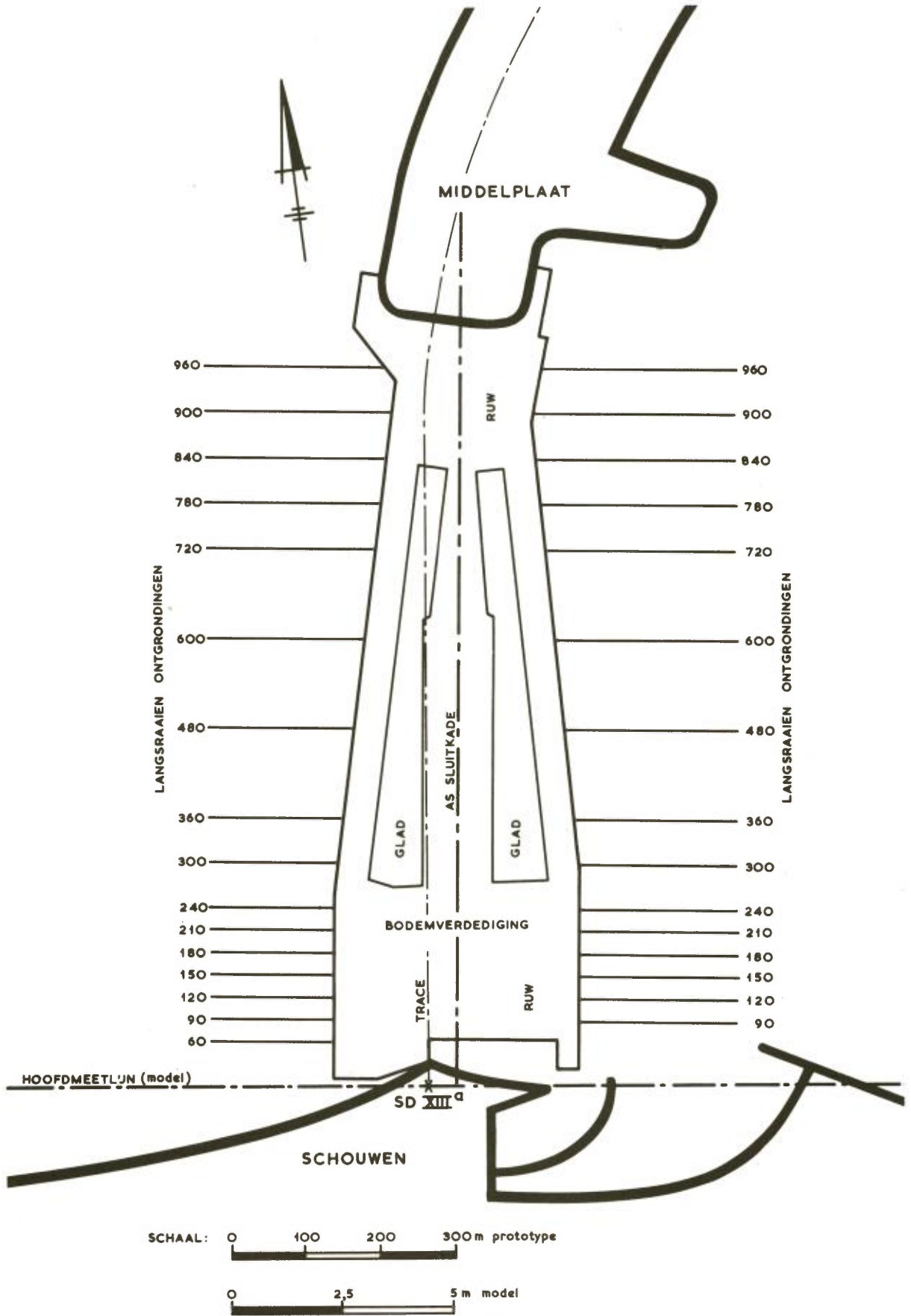
Uit een opgave van de tijdsduur waarover de ontgrondingskuil in het prototype de gelegenheid heeft zich te ontwikkelen volgt nu onmiddellijk voor elke langsgaai de te verwachten maximale ontgrondingsdiepte. Combinatie hiervan met de bijbehorende aanzethelling  $\cotg \beta$  levert een geschematiseerd kuilprofiel, dat als uitgangspunt kan dienen voor de beoordeling van de grondmechanische stabiliteit van konstruktie en/of oevers.

## 7.2. Voorbeeld: zuidelijk sluitgat van het Brouwershavense Gat

Tot slot wordt hier nog in beknopte vorm een voorbeeld gegeven van een toegepast ontgrondingsonderzoek. Gekozen is daarvoor het bouwfasesonderzoek van het zuidelijk sluitgat van het Brouwershavense Gat, uitvoeriger beschreven in de modelverslagen M 675-deel IV (eb) en deel V (vloed).

De afsluiting van het Brouwershavense Gat was zodanig opgezet, dat eerst de damvakken over de ondiepe gedeelten van het tracé werden aangelegd en vervolgens, na uitgebreide voorzorgsmaatregelen ter bescherming van bodem en oevers, de twee overgebleven stroomgeulen gelijktijdig werden geblokkeerd. Terwijl het noordelijke van deze twee sluitgaten werd dichtgezet met behulp van doorlaatcaissons, werd bij het zuidelijke sluitgat de geleidelijke sluitingsmethode toegepast, waarbij met behulp van een kabelbaan een sluitkade van betonblokken werd opgebouwd.

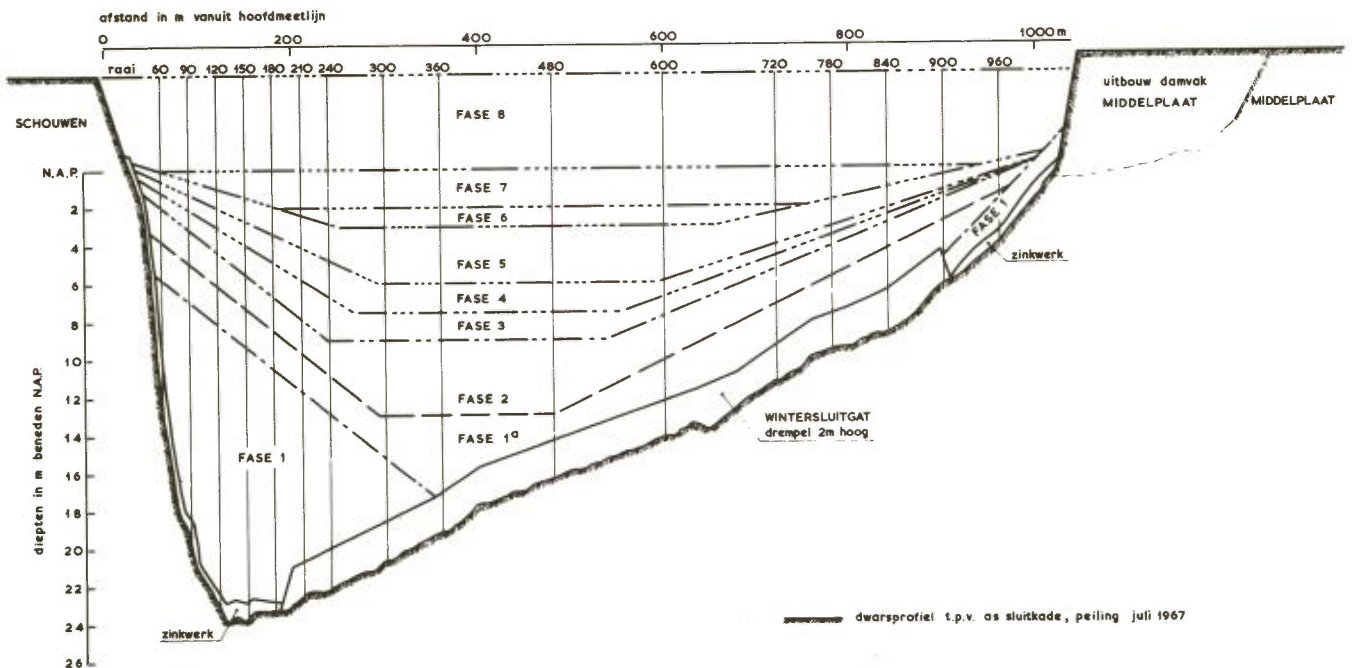
Op grond van modelonderzoek onder vloedcondities werd voor de afsluiting van het zuidelijke sluitgat een fasenschema opgesteld voor de opbouw van de blokkendam. Als doorslaggevend criterium werd daarbij gehanteerd de mate van ontgronding in de nabijheid van de Schouwse oever, die in verband met het risico op afschuiving zo gering mogelijk moest zijn. Het opgestelde bouwfaseschema werd vervolgens op zijn bruikbaarheid onder ebomstandigheden getoetst; daarna werd voor de volledigheid ook de vloodsituatie nogmaals systematisch onderzocht.



Figuur 50. Situatie zuidelijk sluitgat Brouwershavense Gat.

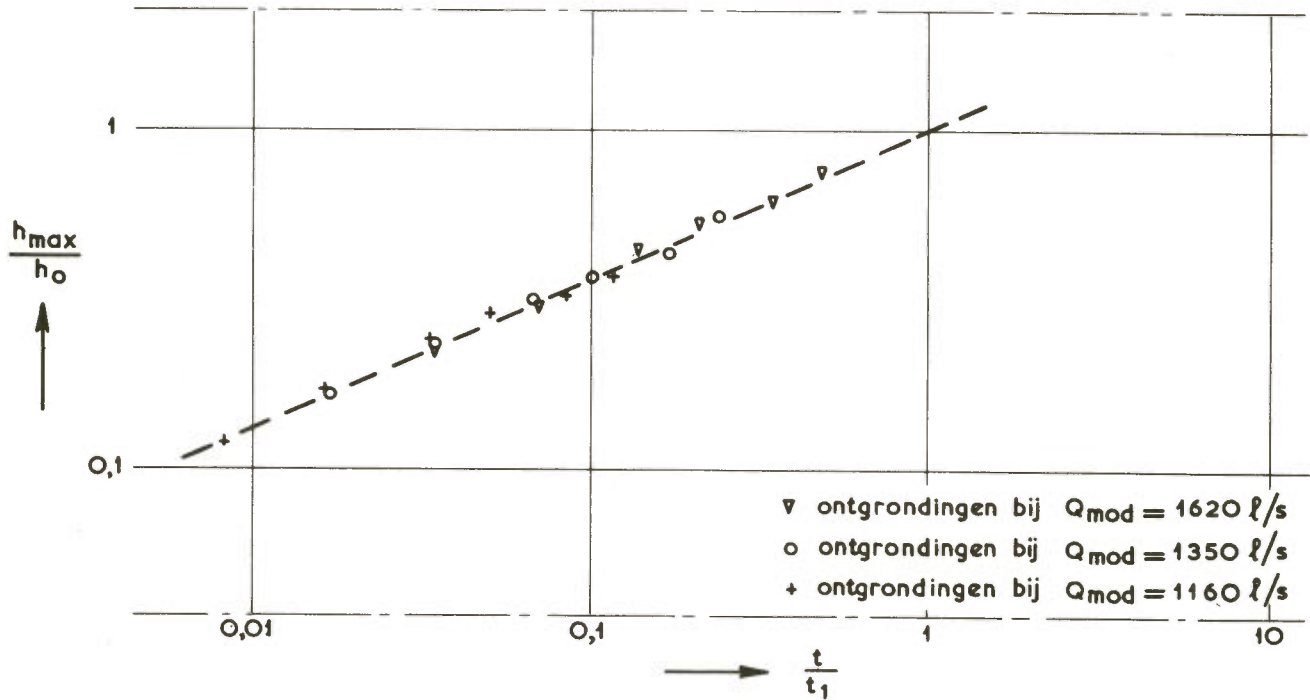
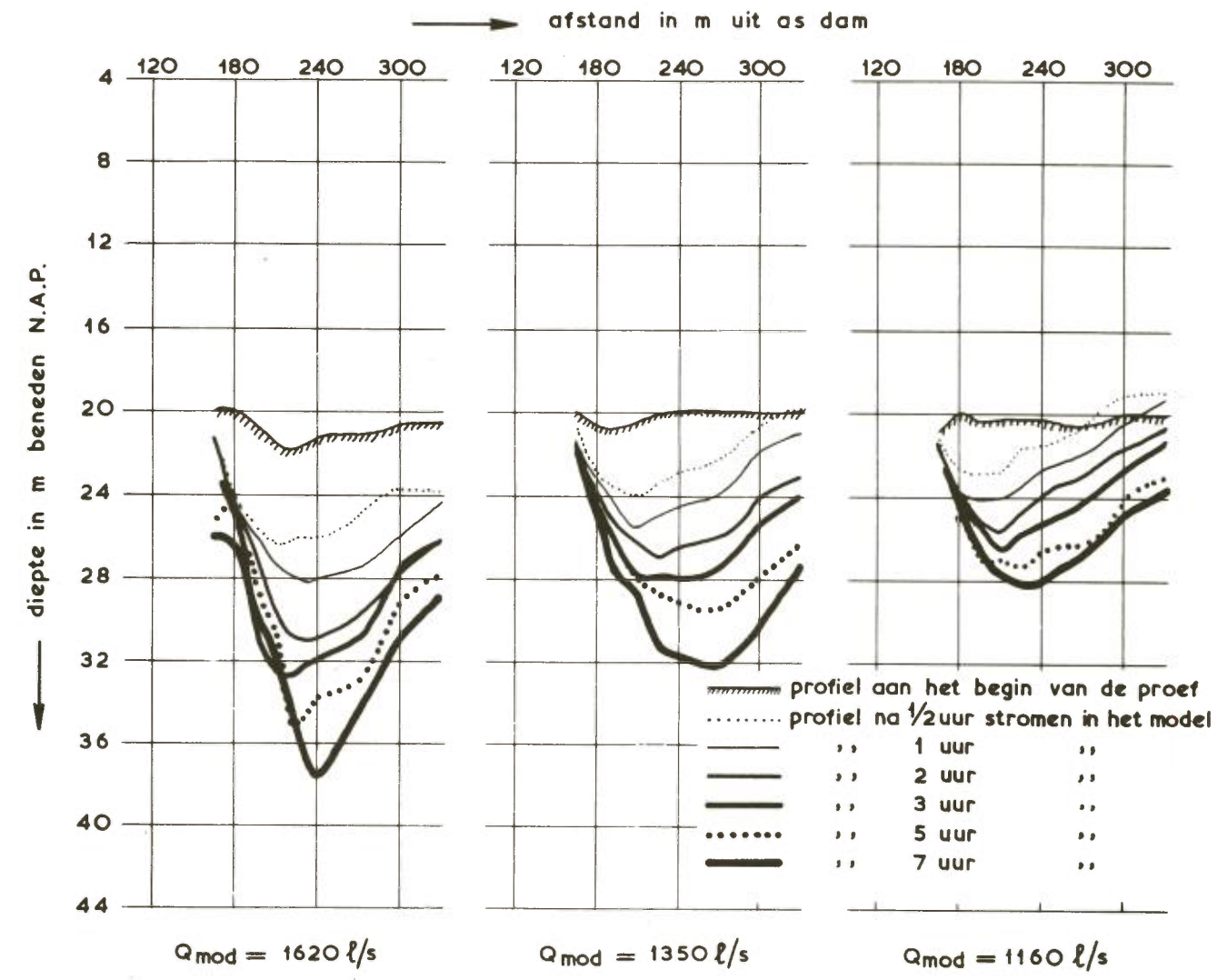


In figuur 50 is de situatie van het sluitgat schematisch afgebeeld. Aangegeven zijn tevens de langstraaien waarin de ontgrondingen zijn gemeten; de ligging hiervan is gekozen aan de hand van het sluitgatprofiel, weergegeven in figuur 51, waarbij de nadruk is gelegd op de omgeving van de Schouwse oever. In figuur 51 staan ook de geplande opbouwfasen van de blokkendam aangegeven, die als het ware momentopnamen voorstellen van de geleidelijke sluiting. Voor het ontgrondingsonderzoek wordt de sluitingsoperatie in een aantal stappen, overeenkomend met de diverse bouwfasen, geschematiseerd en de ontgroning tijdens elke stap bepaald. Uit superpositie volgt dan de totale ontgroning die gedurende de sluitingsperiode optreedt.

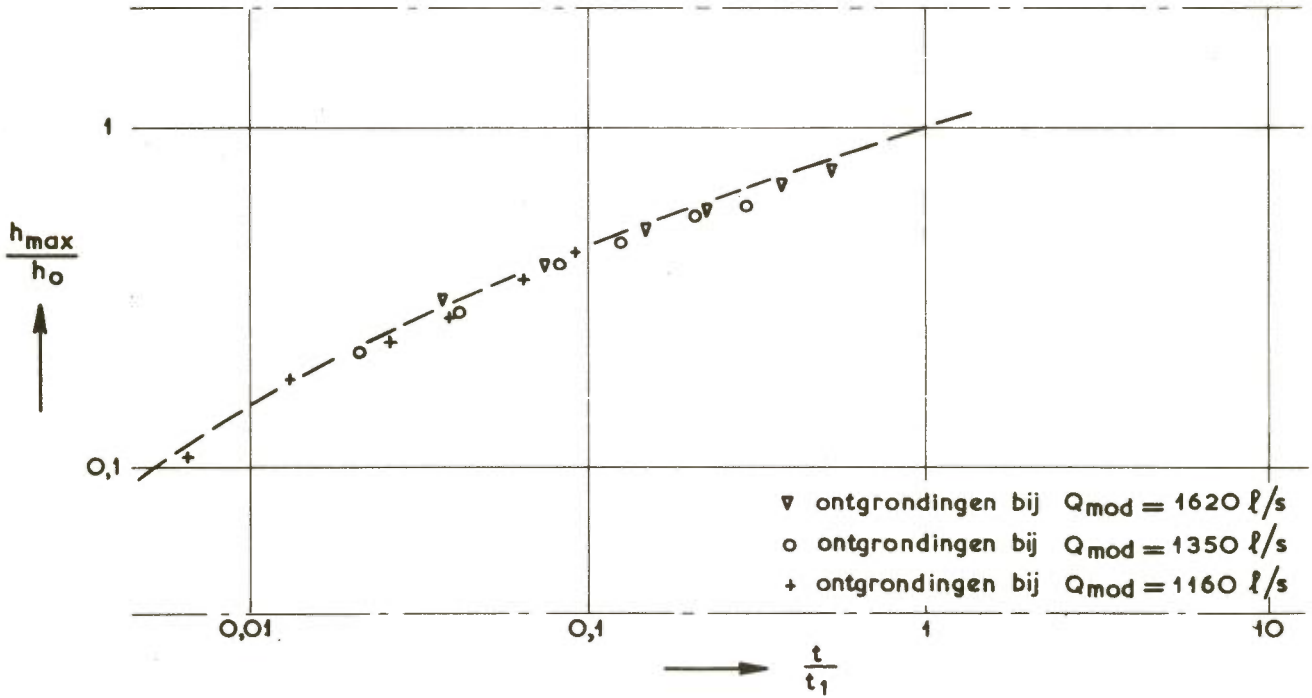
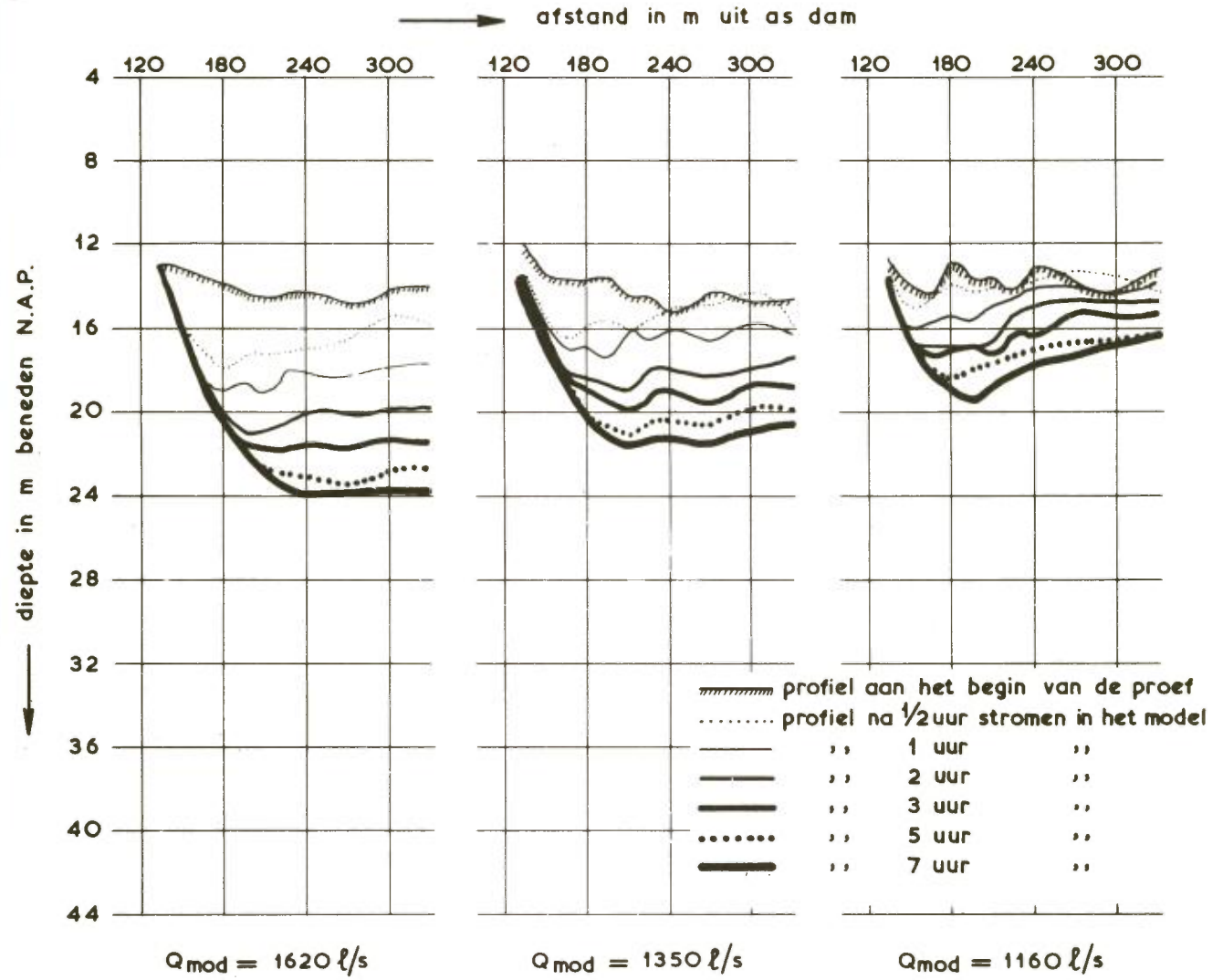


Figuur 51. Sluitgatprofiel met onderzochte bouwfasen.

Elke bouwfase vertegenwoordigt een nieuwe geometrie en vergt dus een afzonderlijk onderzoek. Bij iedere geometrie zijn zowel voor eb als voor vloed drie ontgrondingsproeven met drie verschillende debieten gestroomd. Gepeild werd aan het begin van elke proef bij stilstaand water en vervolgens na 1/2, 1, 2, 3, 5, en 7 uur stromen. De kuilprofielen die uit de peilingen zijn afgeleid, zijn per bouw-fase en per langraai bijeengebracht, zoals bij wijze van voorbeeld in de figuren 52 en 53 voor de raaien 150 en 600 van de wintersluitgatafase bij de ebtoestand is aangegeven. Op de figuren is duidelijk de invloed te zien van de gemiddelde stroomsnelheid  $\bar{u} = Q/A$  op de grootte van de ontgrondingsdiepte, terwijl eveneens de invloed van de plaats in het dwarsprofiel op de kuilvorm onmiddellijk in het oog springt.



Figuur 52. Ontgrondingsprofielen en tijdontgrondingslijn wintersluitgat, raai 150 (eb).



Figuur 53. Ontgrondingsprofielen in tijdontgrondingslijn wintersluitgat, raai 600 (eb).



Uit de ontgrondingsprofielen zijn de aanzethellingen en de tijdontgrondingslijnen afgeleid. Laatstgenoemde zijn, in dimensieloze vorm, eveneens in de figuren 52 en 53 opgenomen en verkregen door de  $h_{\max}/h_o = f(t)$  relaties van de drie op dezelfde situatie betrekking hebbende proeven zodanig langs de tijd-as te verschuiven, dat zij elkaar zo goed mogelijk overlappen en de drie tijdstippen waarop  $h_{\max}/h_o = 1$  is in één punt samenvallen. De vorm van de tijdontgrondingslijn ligt nu reeds vast, terwijl uit de definitie  $t = t_1$  voor  $h_{\max}/h_o = 1$  voor elk geval de waarde van de kenmerkende ontgrondingstijd  $t_1$  volgt. Substitutie van deze  $t_1$ -waarden in de relatie

$$t_1 = 250 \Delta^{1,7} \cdot h_o^2 (\bar{\alpha} - u_{kr})^{-4,3}$$

maakt het mogelijk hieruit  $\alpha$  als enige onbekende op te lossen.

Op deze wijze zijn zowel voor de vloedtoestand als voor de ebtoestand bij elke bouwfase voor elke langsgraai de vorm van de tijdontgrondingslijn en de getalwaarden van  $\alpha$  en  $\cotg \beta$  bepaald\*). Ter illustratie is in onderstaande tabel een overzicht gegeven van de bij het vloedonderzoek gevonden waarden.

bouwfase raai	wintersluitgat		fase 1		fase 1 <sup>a</sup>		fase 2		fase 3		fase 4		fase 5	
	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$	$\alpha$	$\cotg \beta$
90	1,66	6,5												
120	1,82	5,0	2,70	6,5	1,85									
150	1,65	8,3	3,13	3,6	3,04	6,3	1,96	3,6	2,63	3,8	2,86		4,70	4,2
180	1,43	6,8	3,35	5,0	2,84	4,4	3,86	2,9	3,50	3,7	3,30	4,2	3,84	4,2
210	1,94	5,6	2,78	6,0			3,81	2,9	2,83	5,8	2,78			
240	2,12	5,0	1,99	6,8	1,48		2,84	2,8	1,72	6,8				
300	2,41	5,0	2,93	5,8	2,98	4,3	4,87	2,9	3,35	4,4	3,30		2,70	
360	2,32	5,4	3,15	6,8	2,92	4,4	2,77	3,9	3,99	3,1	4,91	5,0	2,28	
480	1,47	4,7	3,28	4,0	2,44	3,3	4,17	2,9	4,12	3,0	4,18	2,8	5,10	2,9
600	1,63	5,4	2,65	5,4	2,36	4,3	3,54	3,3	4,75	2,8	4,87	2,8	4,96	3,0
720	1,96	6,5	2,45	6,8	2,36	4,4	2,98	2,9	3,55	3,3	4,57	3,0	3,52	3,7
780	1,92	7,5	2,46	7,5	2,02	5,8	2,99	3,3	3,78	5,0	4,18	3,9	3,51	6,8
840	1,84	6,8	1,86	6,8	1,63	6,8	3,14	5,0	2,54		4,10	3,3	3,90	
900	1,92	7,1	1,56		1,22		2,22	5,8	3,08		3,20	5,6	4,11	
960									2,81		2,83		4,21	

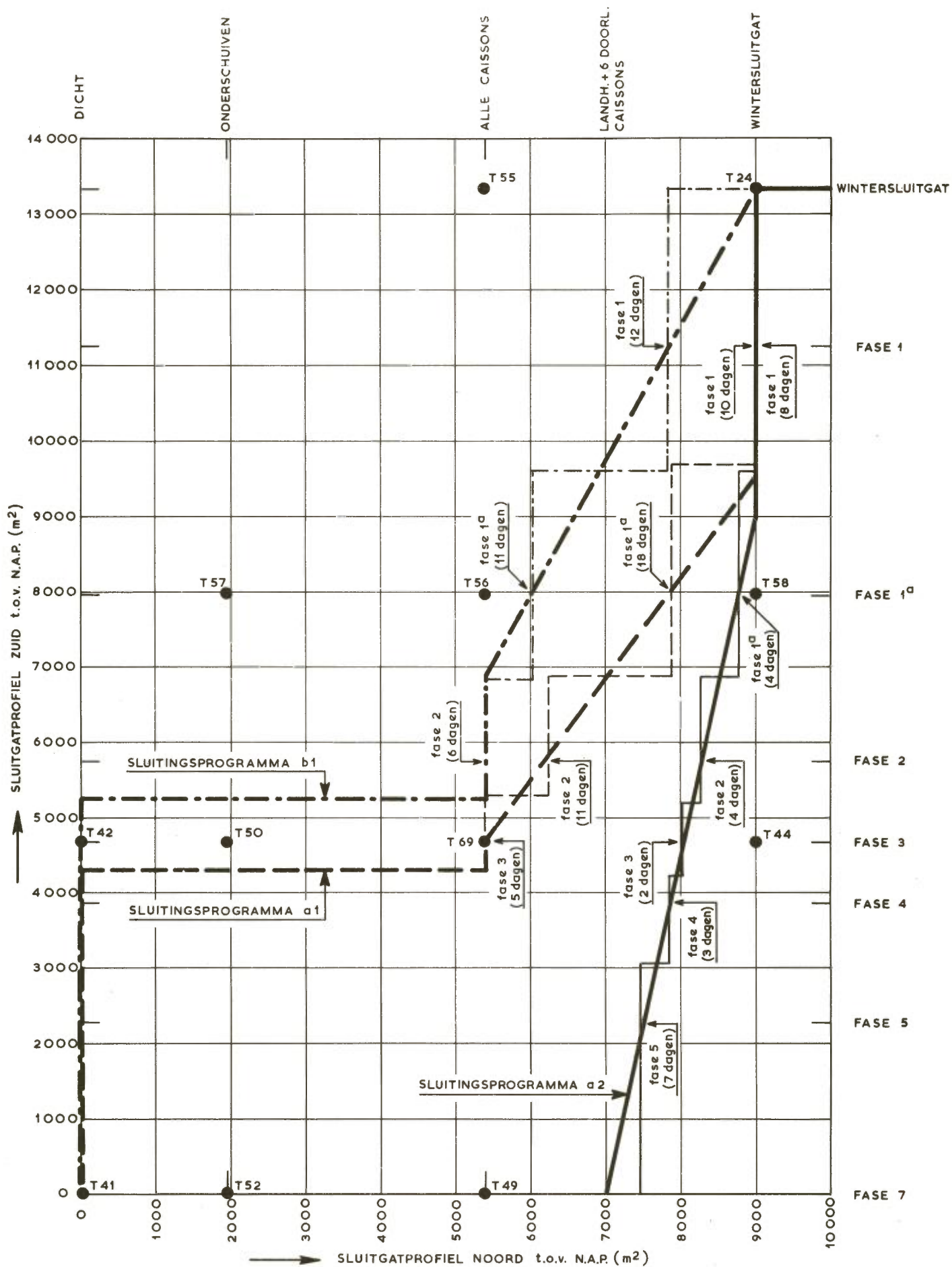
\*) Bij het ebonderzoek is destijds de bepaling van de aanzethelling achterwege gebleven, terwijl bij het vloedonderzoek een eventueel verschil in  $\cotg \beta$  tussen model en prototype tengevolge van het verschil in  $\bar{u}/w$ -waarden is genegeerd.

De stroomkondities in het prototype konden in dit geval worden ontleend aan het onderzoek in het overzichtsmoedel van het Brouwershavense Gat M 886, waarin voor een groot aantal kombinaties van sluitingsfasen in noordelijk en zuidelijk sluitgat de getijbeweging werd gemeten. Voor een willekeurige fase van de afsluiting in noord en zuid kon door interpolatie van deze gegevens het verloop van debieten en waterstanden nabij de sluitgaten worden afgeleid. Bij een gegeven programma voor de sluitingsprocedure, waarin de voortgaande profielvernauwing van de twee sluitgaten op elkaar is betrokken, was het dus mogelijk voor elk gewenst moment de stroomkondities vast te stellen. Om een indruk te krijgen van de invloed van variaties in het sluitingsprogramma op het te verwachten ontgrondingsbeeld zijn de ontgrondingen in het prototype berekend voor drie verschillende sluitingsprogramma's, waarvan twee extreem ongunstige situaties voor het zuidelijke sluitgat weergegeven en het derde een extreem gunstige situatie. Het schema van deze drie sluitingsprogramma's is afgebeeld in figuur 54; de zwarte stippen in deze figuur geven de situaties aan waarbij de stroomkondities in M 886 zijn bepaald.

De bij het ongunstige sluitingsprogramma b1 behorende debiet- en waterstandsverlopen zijn weergegeven in de figuur 55 en 56. De waterstanden aan de binnen(=oost-)zijde van de dam ondervinden bij de voortschrijdende afsluiting van het doorstroomprofiel duidelijk de invloed van het veranderende regiem, zoals in figuur 56 tot uiting komt. Aan de zee(=west-)zijde zijn de veranderingen zo minimaal, dat ze voor de berekening verwaarloosd zijn en voor alle fasen het gemiddelde waterstandsverloop is gebruikt. Met deze gegevens over de stroomtoestanden in de verschillende bouwfasen is nu voor elke raai de grootte van  $t_1$ -prototype berekend met de formule

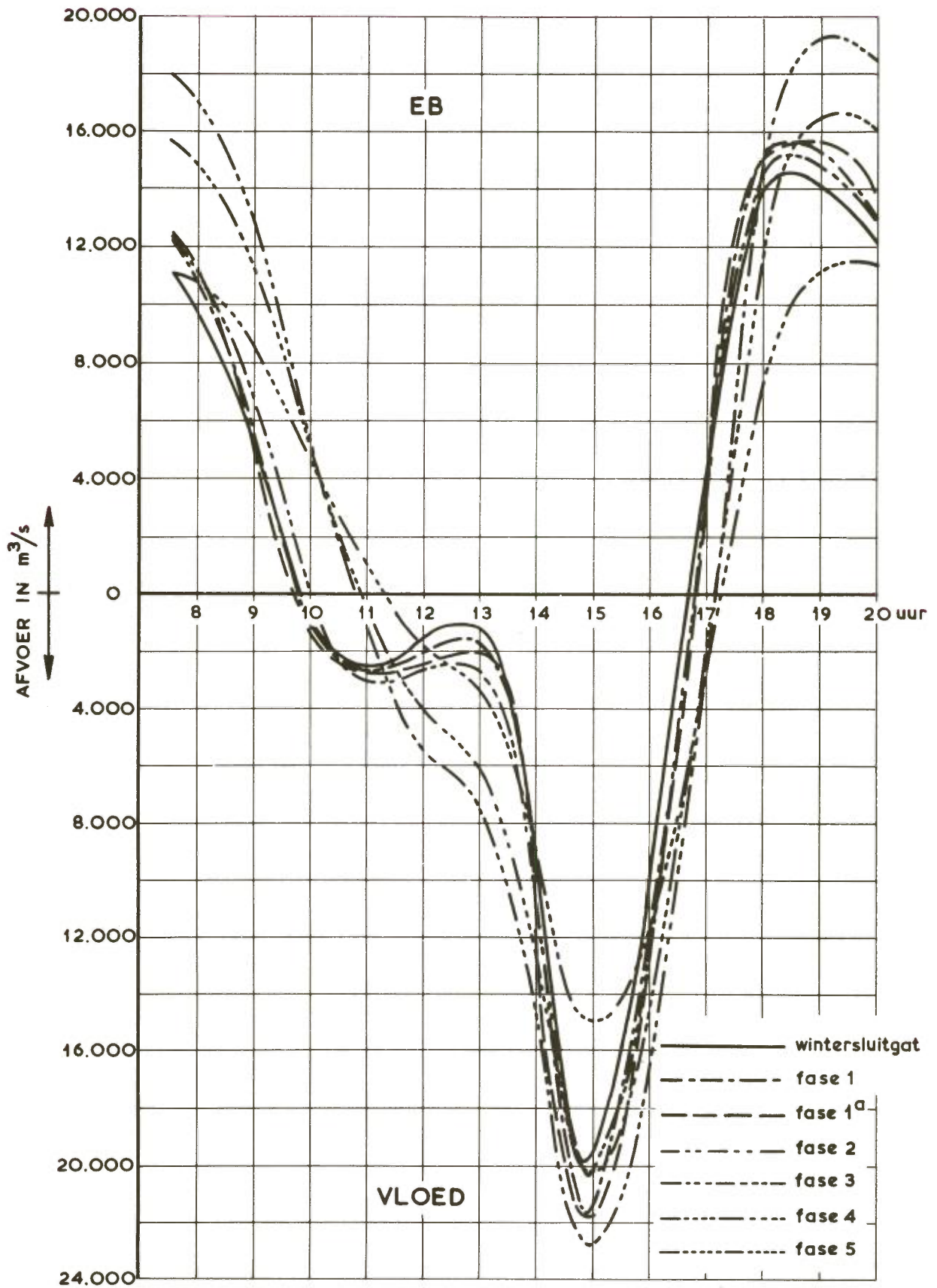
$$t_1 = \frac{250 \Delta^{1,7} \cdot h_o(0)}{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \left\{ \frac{\alpha \frac{Q(t)}{A(t)} - u_{kr}}{h_o(t)} \right\}^{4,3} dt}$$

waarin de getijperiode  $T = 12,5$  uur gesteld is en voor  $h_o(0)$  de waterdiepte ten opzichte van N.A.P. is aangehouden. De tijdstippen  $T_1$  en  $T_2$  korresponderen met de stroomkenteringen van vloed naar eb en omgekeerd. Er is hierbij aangenomen, dat de ontgronding alleen plaatsvindt benedenstrooms van blokkendam en bodembescherming, dus bij vloedstroom aan de binnenzijde van de dam en bij ebstroom aan de zeezijde daarvan.

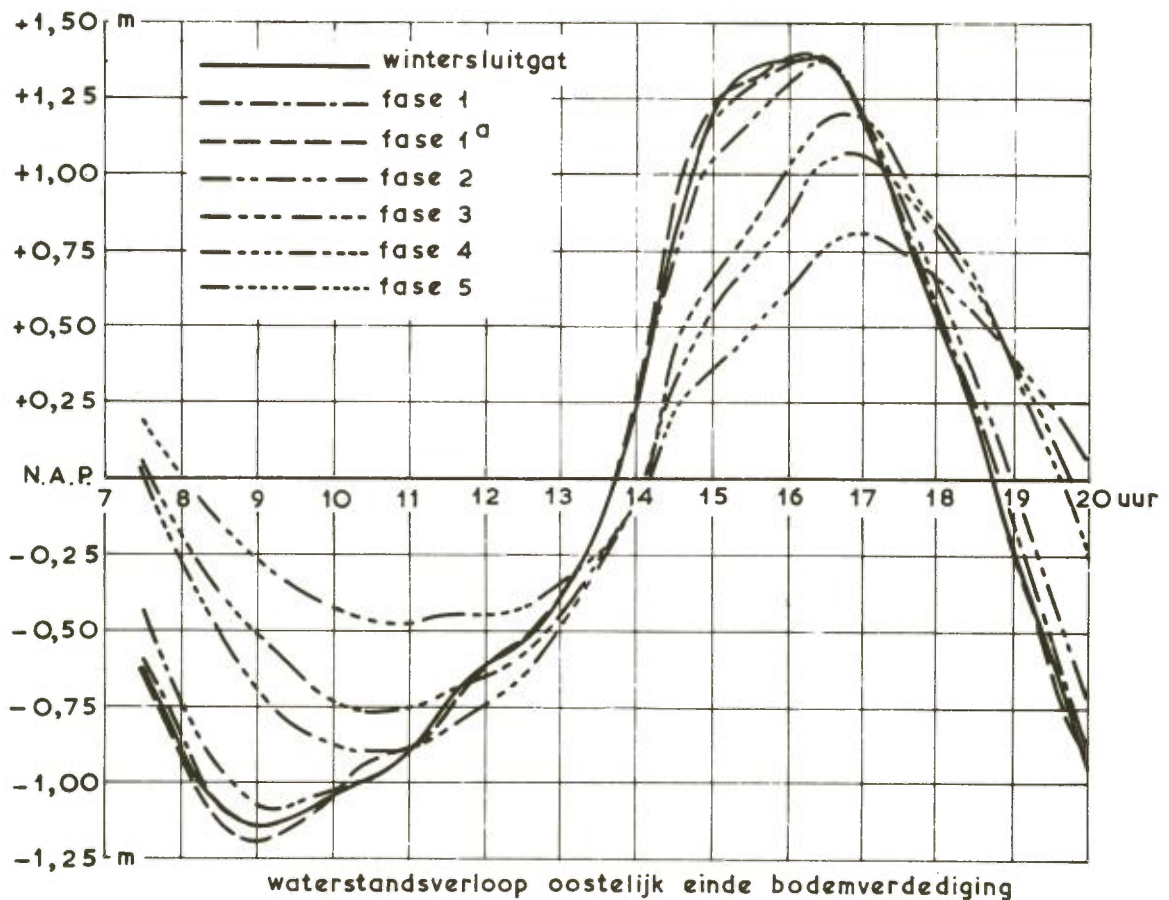
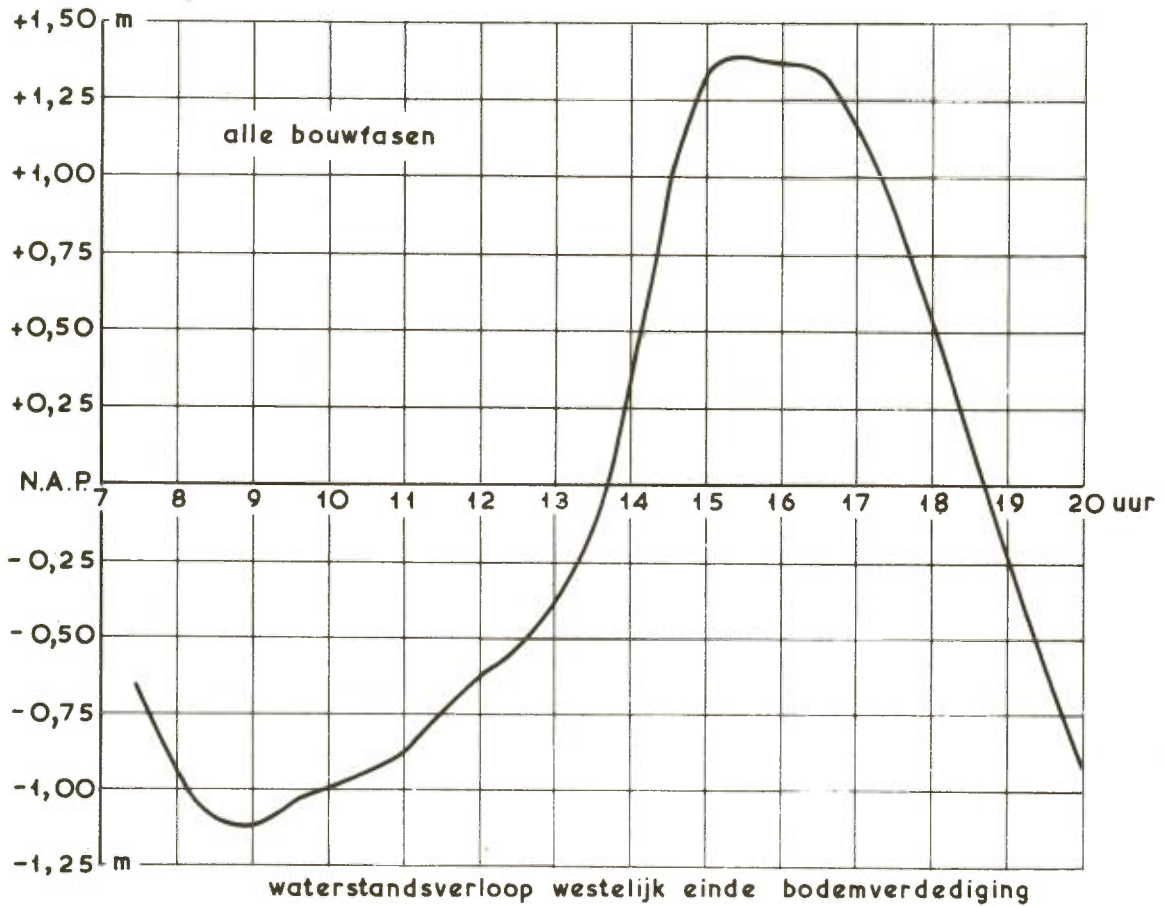


Figuur 54. Sluitingsprogramma's, waarvoor de ontgrondingen zijn berekend.



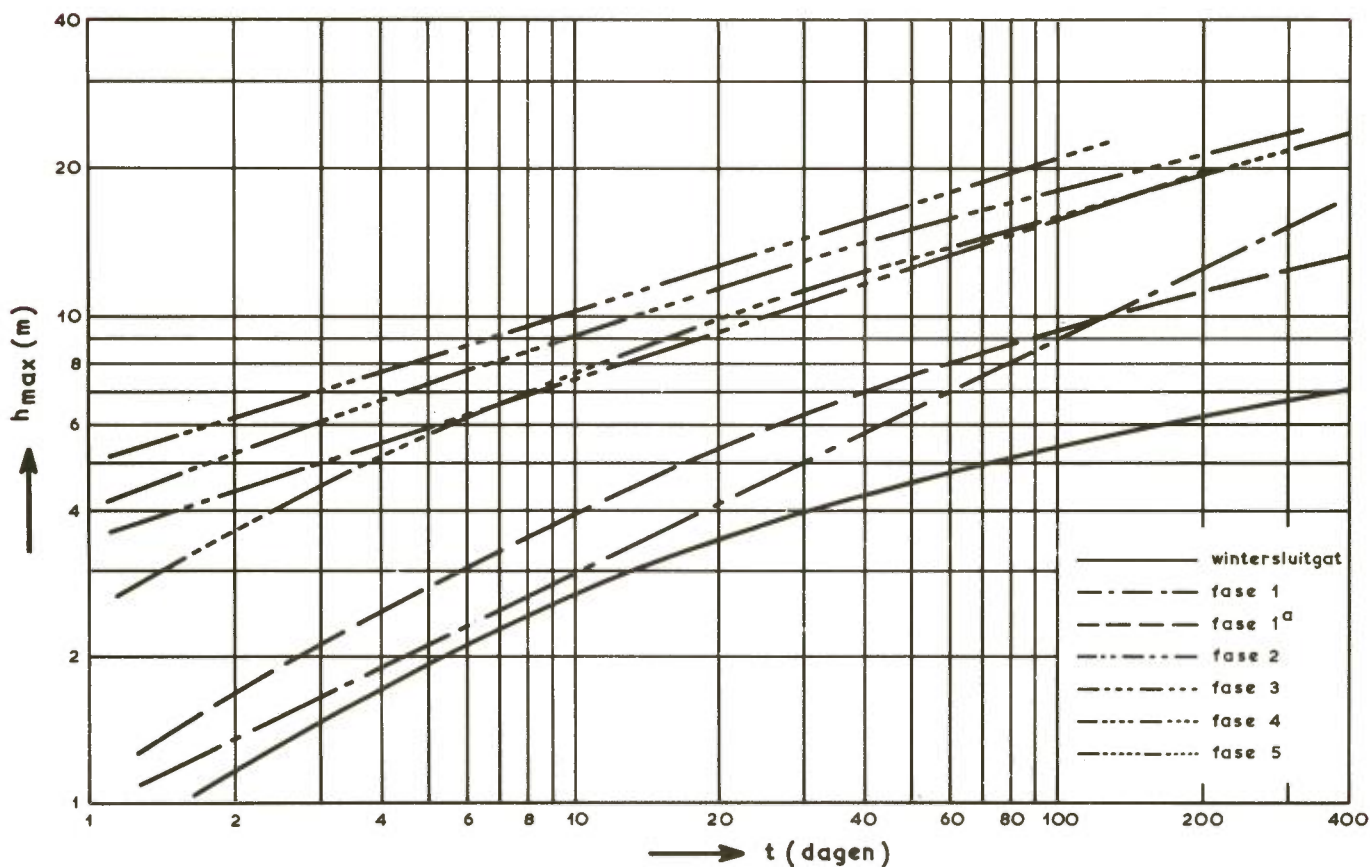


Figuur 55. Debietverloop bij sluitingsprogramma b1.



Figuur 56. Waterstandsverloop bij sluitingsprogramma b1.

De berekende  $t_1$ -tijden zijn gekombineerd met de  $h_o$ -waarden van de betreffende raaien. Door het hierdoor gefixeerde punt van het  $h_{max} - t$  diagram zijn de bekende tijdontgrondingslijnen getrokken. Voor eenzelfde langsraai zijn de tijdontgrondingslijnen behorende bij de verschillende bouwfases in één figuur gekombineerd. Figuur 57 geeft daar een voorbeeld van. De maximale ontgrondingsdiepte in die raai wordt nu gevonden door eerst de tijdontgrondingslijn van de wintersluitgafase te volgen, zolang als deze fase duurt, vervolgens de bereikte ontgrondingsdiepte over te brengen op de tijdontgrondingslijn voor fase 1 en hierlangs verder te gaan over een tijdsinterval overeenkomend met de duur van deze bouwfase, enz., totdat tenslotte aan het einde van fase 5 de ontgraving verondersteld wordt tot een einde te komen. Dit proces is voor elke raai uitgevoerd voor alle drie sluitingsprogramma's, eb en vloed.



Figuur 57. Prototype-tijdontgrondingslijnen, sluitingsprogramma b1, raai 480 (vloed).

De invloed van de materiaalaanvoer van bovenstrooms is bij dit onderzoek niet volgens de in paragraaf 6.4. beschreven methode in rekening gebracht, maar op een andere wijze. Namelijk door de ontgraving tijdens de wintersluitgafase, waarin het reducerende effect verreweg het sterkst is wegens de lange duur van deze

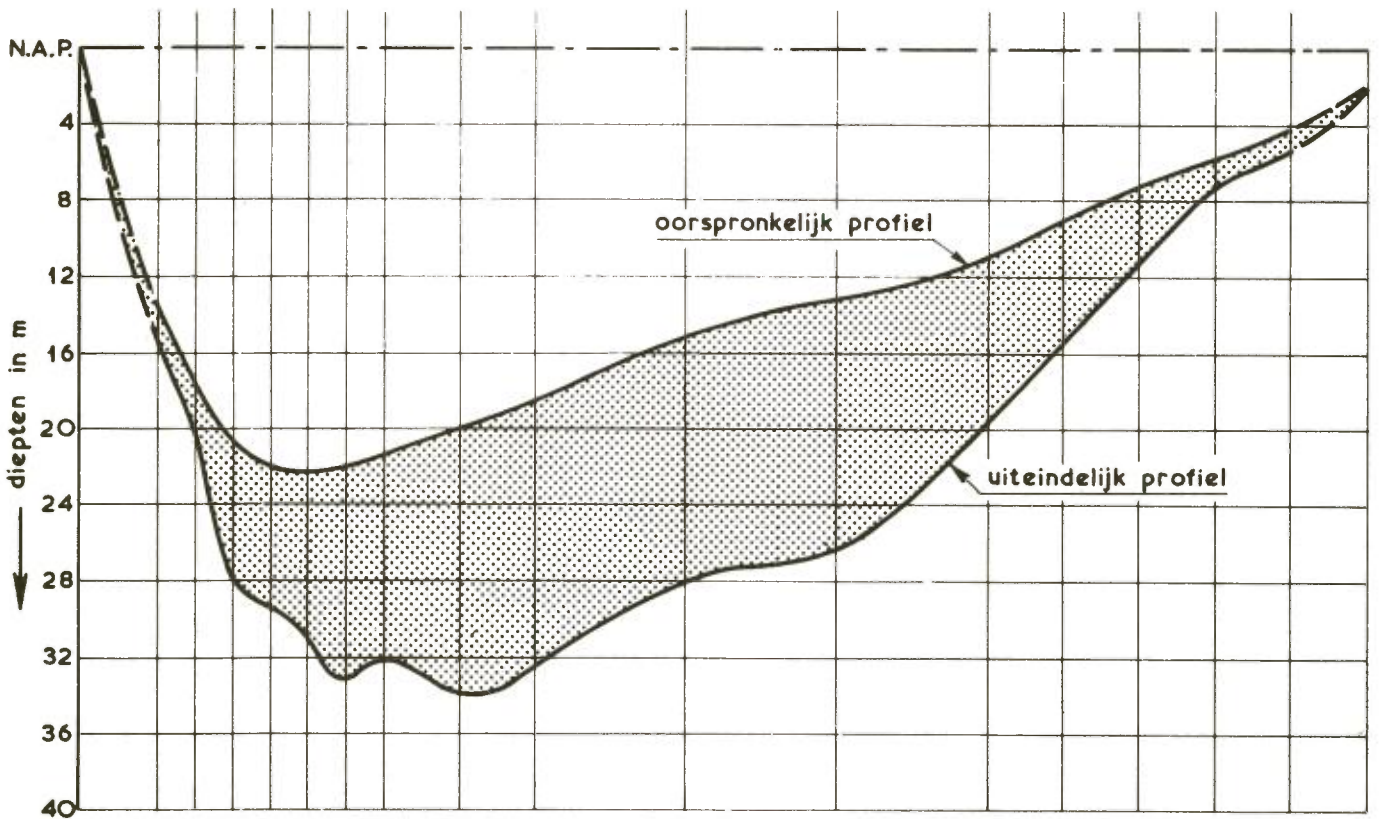
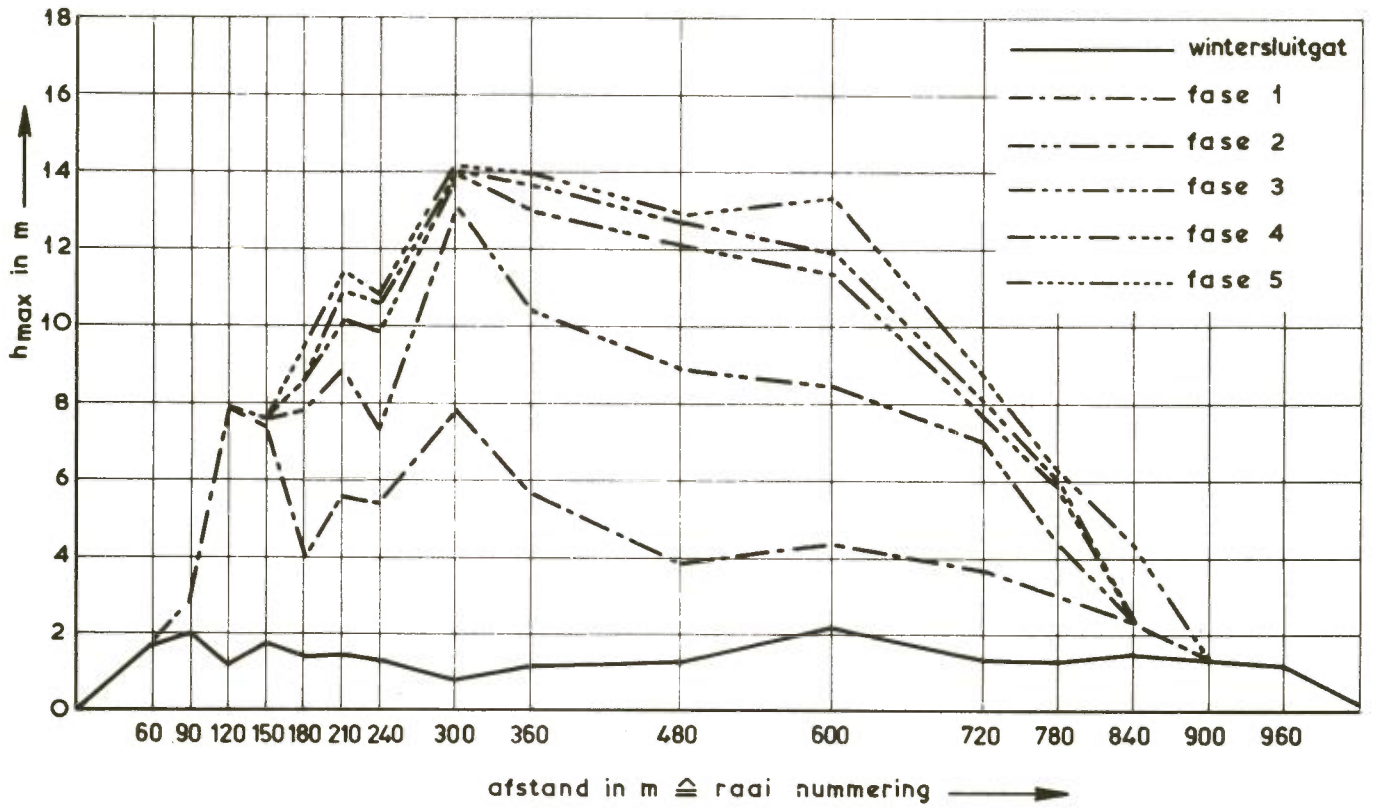


bouwfase en het relatief geringe ontgrondend vermogen van de stroom, af te leiden uit de bodemveranderingen in het prototype zelf. Dit was mogelijk doordat ten tijde van het onderzoek de wintersluitgatifase in het zuidelijke sluitgat reeds zolang was gerealiseerd, dat de daardoor veroorzaakte ontgroning geacht kan worden tot een evenwicht te zijn gekomen. Niet de uit het model gevonden waarde van  $h_{\max}$  - wintersluitgat is dus als begintoestand genomen van de ontgroning tijdens fase 1, maar de in het prototype opgemeten maximale diepte benedenstrooms van de bodemverdediging.

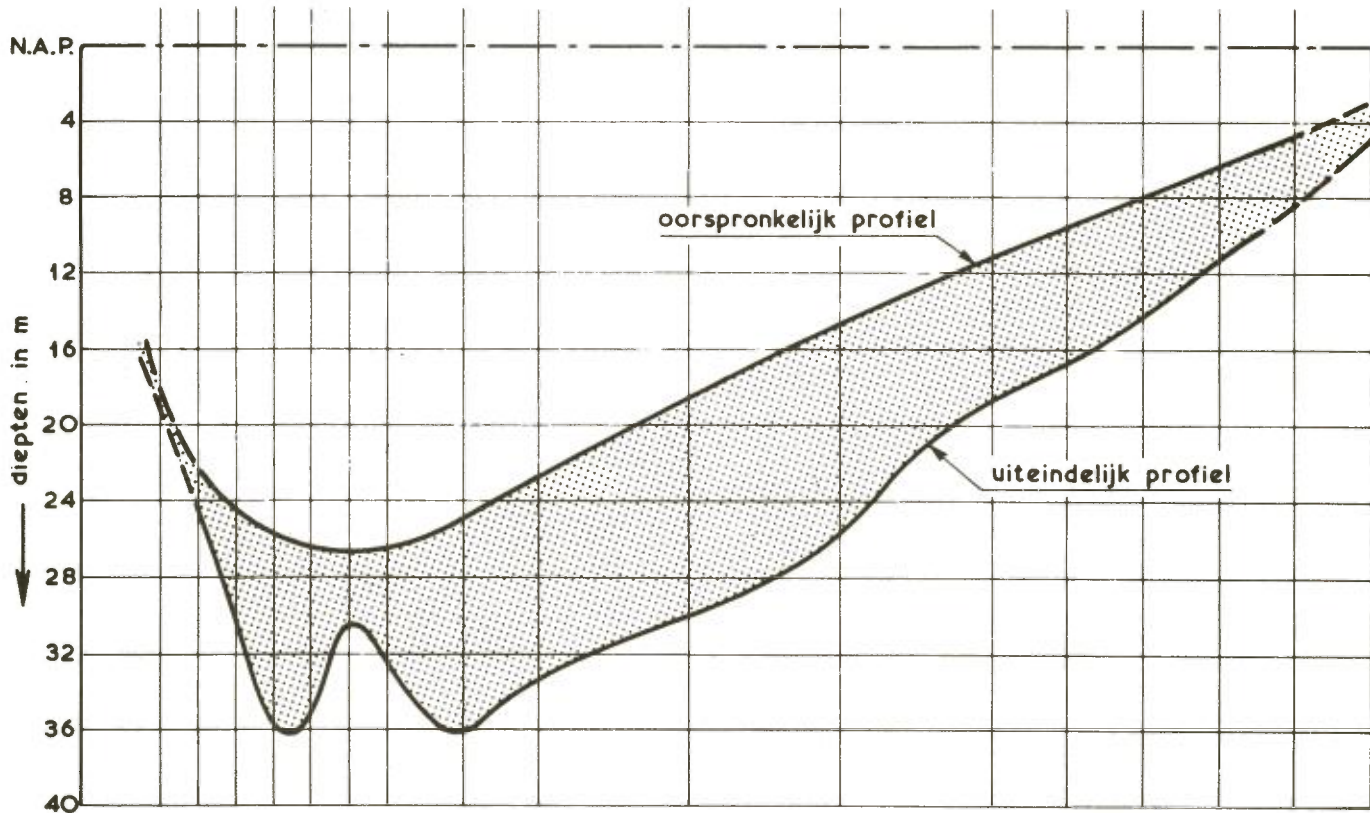
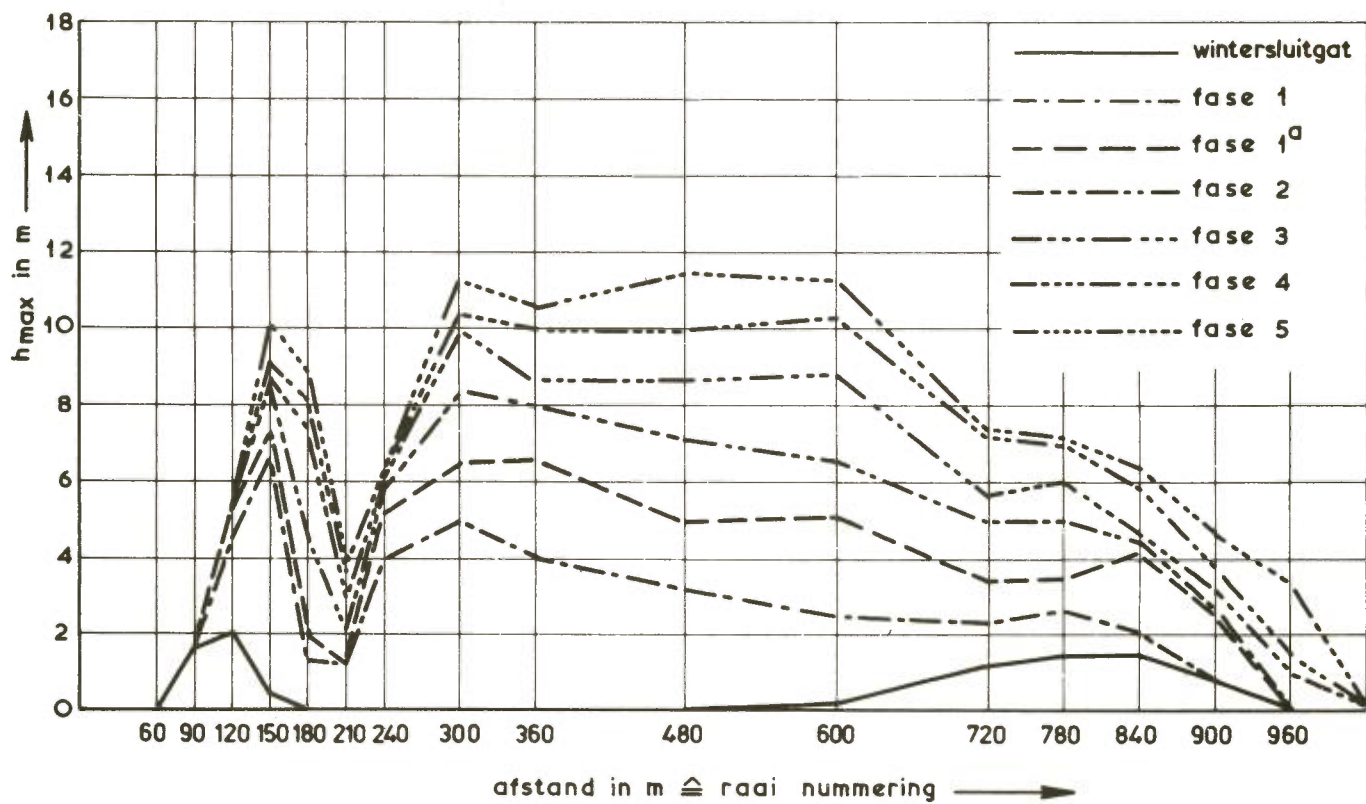
De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in de figuren 58 en 59 waarop voor eb respectievelijk voor vloed de bij het sluitingsprogramma b1 te verwachten maximale ontgrondingsdiepten zijn aangegeven, gespecificeerd naar langsraai en bouwfase en tevens per raai opgeteld. Eveneens is aangegeven de door de ontgroning veroorzaakte maximale verdieping van het bodemprofiel. Hoewel door de wijze van weergeven gesuggereerd, treden deze maximale verdiepingen niet allemaal precies in het zelfde dwarsprofiel op, maar liggen zij, afhankelijk van de aanzet-hellingen van de ontgrondingskuilen, op enigszins variërende afstanden vanuit de rand van de bodembescherming. Deze afstanden zijn af te leiden uit figuur 60, waarin voor de vloedtoestand de bij het sluitingsprogramma b1 behorende kuilprofielen in geschematiseerde vorm zijn aangegeven.



Op soortgelijke wijze als hierboven beschreven zijn ook voor andere sluitgaten ontgrondingsonderzoeken uitgevoerd. Hierbij konden de inzichten en wetmatigheden die met het systematische twee- en driedimensionale ontgrondingsonderzoek verkregen zijn op situaties uit de praktijk worden toegepast. In bepaald opzicht afwijkende praktijksituaties kunnen mogelijk nieuwe vragen op het gebied van lokale ontgrondingsprocessen opwerpen. Het laat zich aanzien dat daardoor het fundamentele onderzoek met betrekking tot deze materie voortbouwend op hetgeen in het hier beschreven onderzoek is bereikt, verder zal worden gestimuleerd.

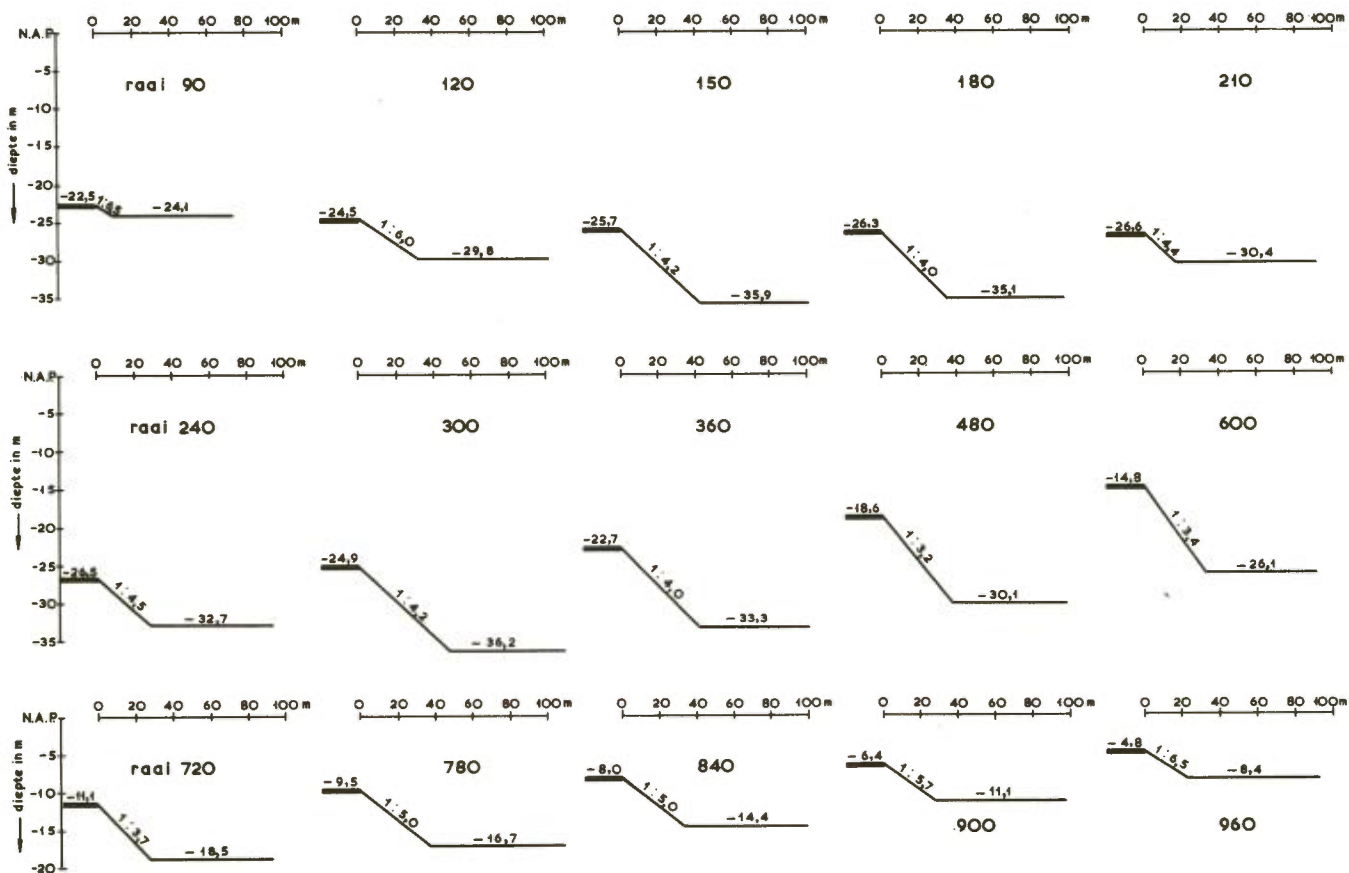


Figuur 58. Te verwachten maximale ontgrondingsdiepten bij sluitingsprogramma b1 (eb).



Figuur 59. Te verwachten maximale ontgrondingsdiepten bij sluitingsprogramma b1 (vloed).





Figuur 60. Geschematiseerde kuilprofielen, sluitingsprogramma b1 (vloed).

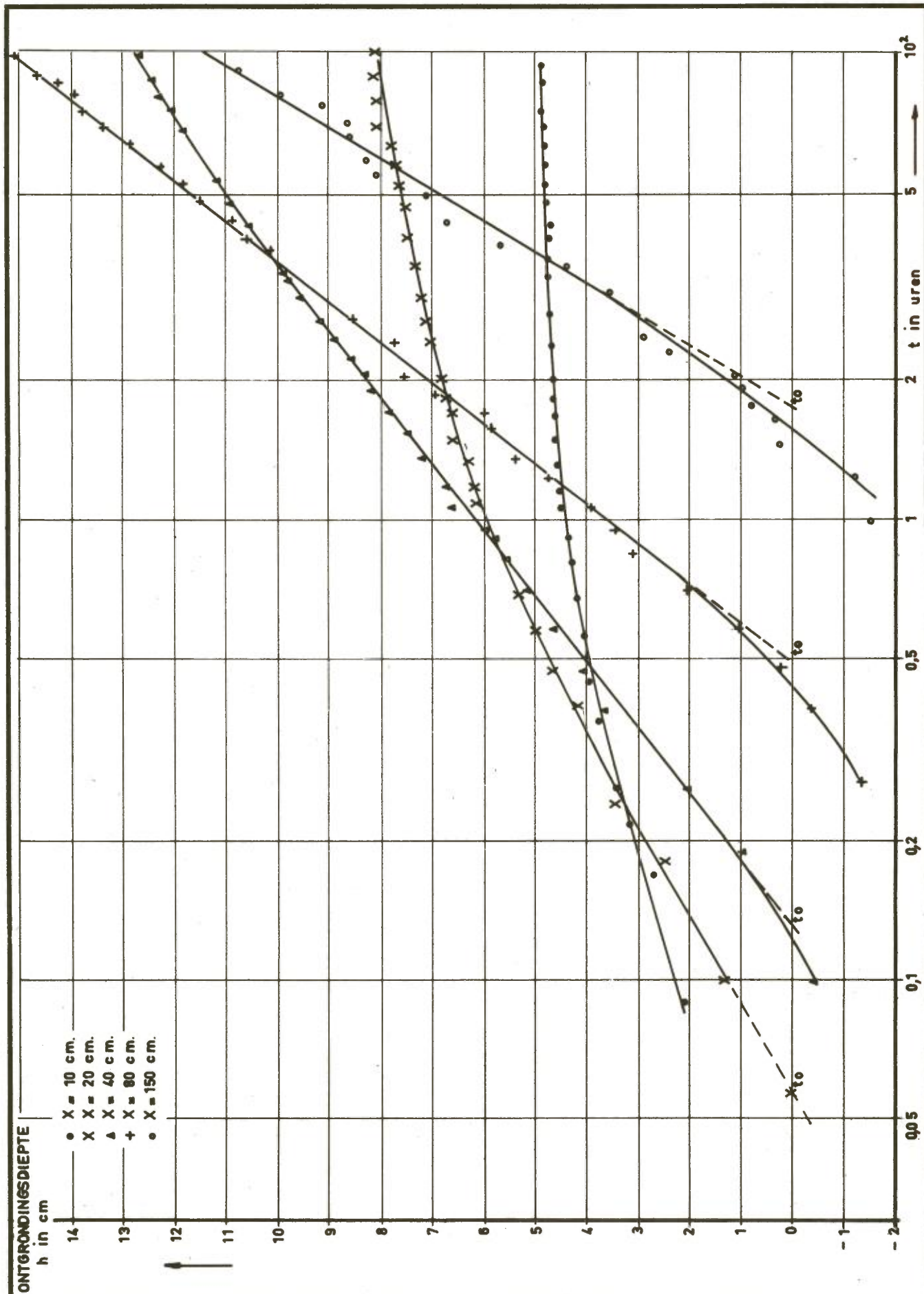
LITERATUUR

- [1] J.O. Hinze: "Zandtransport door turbulentie", M 648, notities 1...9.  
Niet gepubliceerd, beschikbaar in WL-bibliotheek.
- [2] F. Spaargaren: "Beschouwing over de ontgronding benedenstrooms van een bodembescherming bij een twee-dimensionaal stroombeeld".  
R.W.S. Deltadienst, Waterloopkundige Afdeling, nota W 781, 1964.
- [3] J.E. Prins: "Echelle de temps dans la reproduction d'un affouillement".  
La Houille Blanche, 18, 1963. no 2, pp. 183-188.
- [4] H.N.C. Breusers: "Conformity and time scale in two-dimensional local scour".  
Proc. Symp. on model and prototype conformity. Poona 1966, pp, 1-8.  
(WL-publikatie no. 40).
- [5] H.N.C. Breusers: "Time scale of local scour".  
Proc. XIIth IAHR Congress, Ft. Collins 1967, paper C32.
- [6] H.N.C. Breusers: "Two-dimensional local scour in loose sediments".  
De Ingenieur, 1968, nr. 44; engelse weergave van voordracht tijdens Symposium  
"Geulafsluitingen in Getijgebieden" (WL-RWS-publikatie no. 64).
- [7] J.J. Vinjé: "Local scour caused by vortex streets".  
De Ingenieur, 1968, nr. 47, engelse weergave van voordracht tijdens Symposium  
"Geulafsluitingen in Getijgebieden" (WL-RWS-publikatie no. 64).
- [8] F. Spaargaren: "Beschouwing over de invloed van het rollend en zwevend transport op de ontgrondingen benedenstrooms van een bodembescherming".  
R.W.S., Deltadienst, Waterloopkundige Afdeling, nota W69-107.
- [9] E. Mosonyi und B. Schoppmann: "Ein Beitrag zur Erforschung von örtlichen Auskolkungen hinter geneigten Befestigungsstrecken in Abhängigkeit der Zeit".  
Karlsruhe, 1968, Vers. Anst. Wasserbau und Kulturtechnik, Th. Rehbock  
Flussbaulaboratorium, Mitt. Heft 154, pp. 1-33.

- [10] J.W. Dietz: "Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluss".  
Karlsruhe, 1969, Vers. Anst. Wasserbau und Kulturtechnik, Th. Rehbock  
Flussbaulaboratorium, Mitt. Heft 155, pp. 1-120.
- [11] M.R. Carstens: "Similarity laws for localized scour".  
Proc. A.S.C.E., 92, 1966, Hydr. Divn. HY 3, May, pp. 13-36.







ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE VAN DE TIJD

$h_0 = 30$  cm       $B/h_0 = 1,67$        $q = 160$  l/s/m<sup>1</sup>

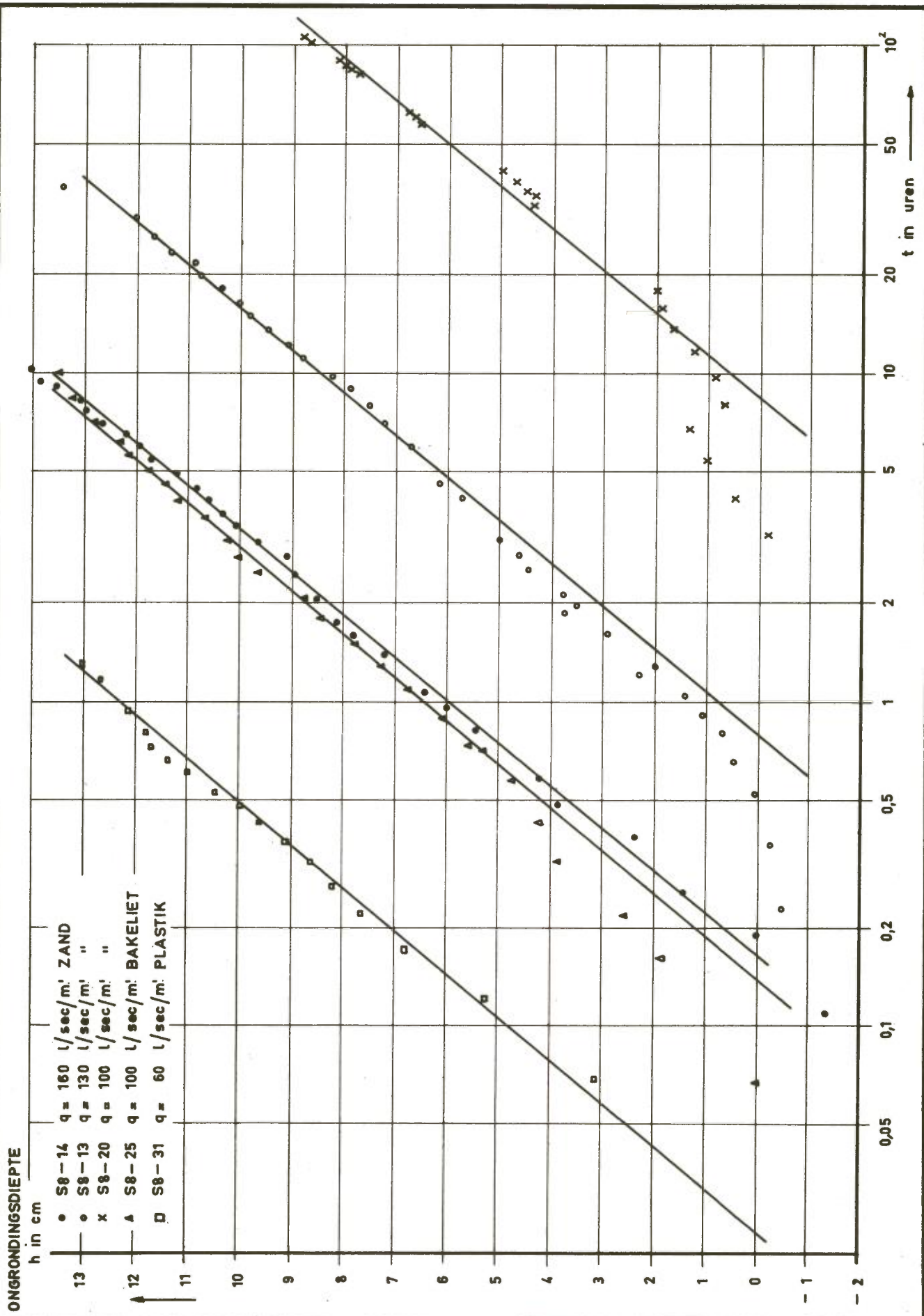
serie 1

zand - 350  $\mu$ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 648/863

BJL.I-1



ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE VAN DE TIJD

serie 1

$h_0 = 30 \text{ cm}$

$B/h_0 = 1,67$

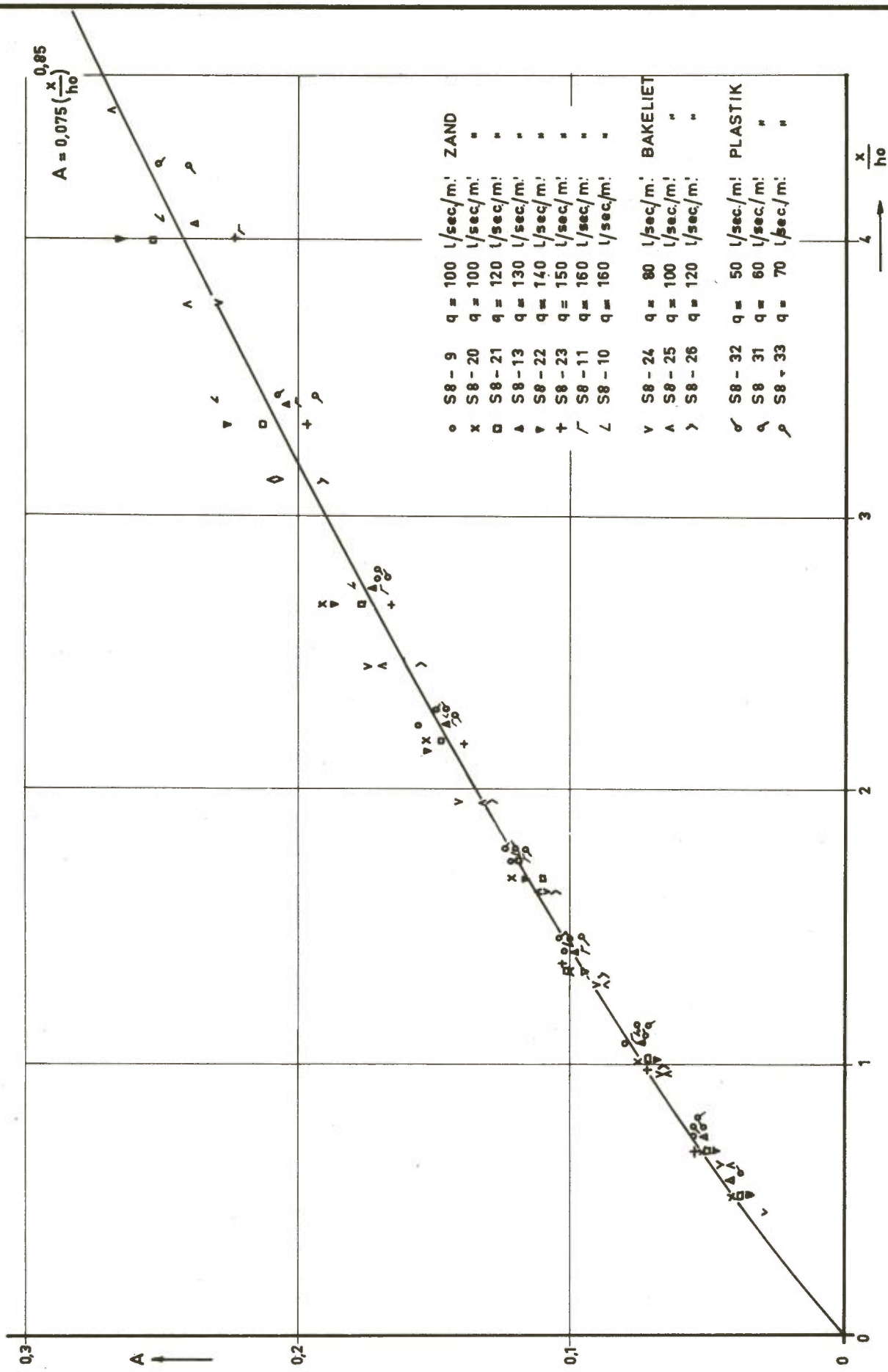
$x = 50 \text{ cm}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 648/863

BUL. I-2





- o S8-9 q = 100 l/sec/m: ZAND
- x S8-20 q = 100 l/sec/m: "
- S8-21 q = 120 l/sec/m: "
- △ S8-13 q = 130 l/sec/m: "
- ▽ S8-22 q = 140 l/sec/m: "
- + S8-23 q = 150 l/sec/m: "
- ∩ S8-11 q = 160 l/sec/m: "
- ∟ S8-10 q = 160 l/sec/m: "
- ∪ S8-24 q = 80 l/sec/m: BAKELIET
- ∧ S8-25 q = 100 l/sec/m: "
- > S8-26 q = 120 l/sec/m: "
- ∩ S8-32 q = 50 l/sec/m: PLASTIK
- ∩ S8-31 q = 60 l/sec/m: "
- ∩ S8-33 q = 70 l/sec/m: "

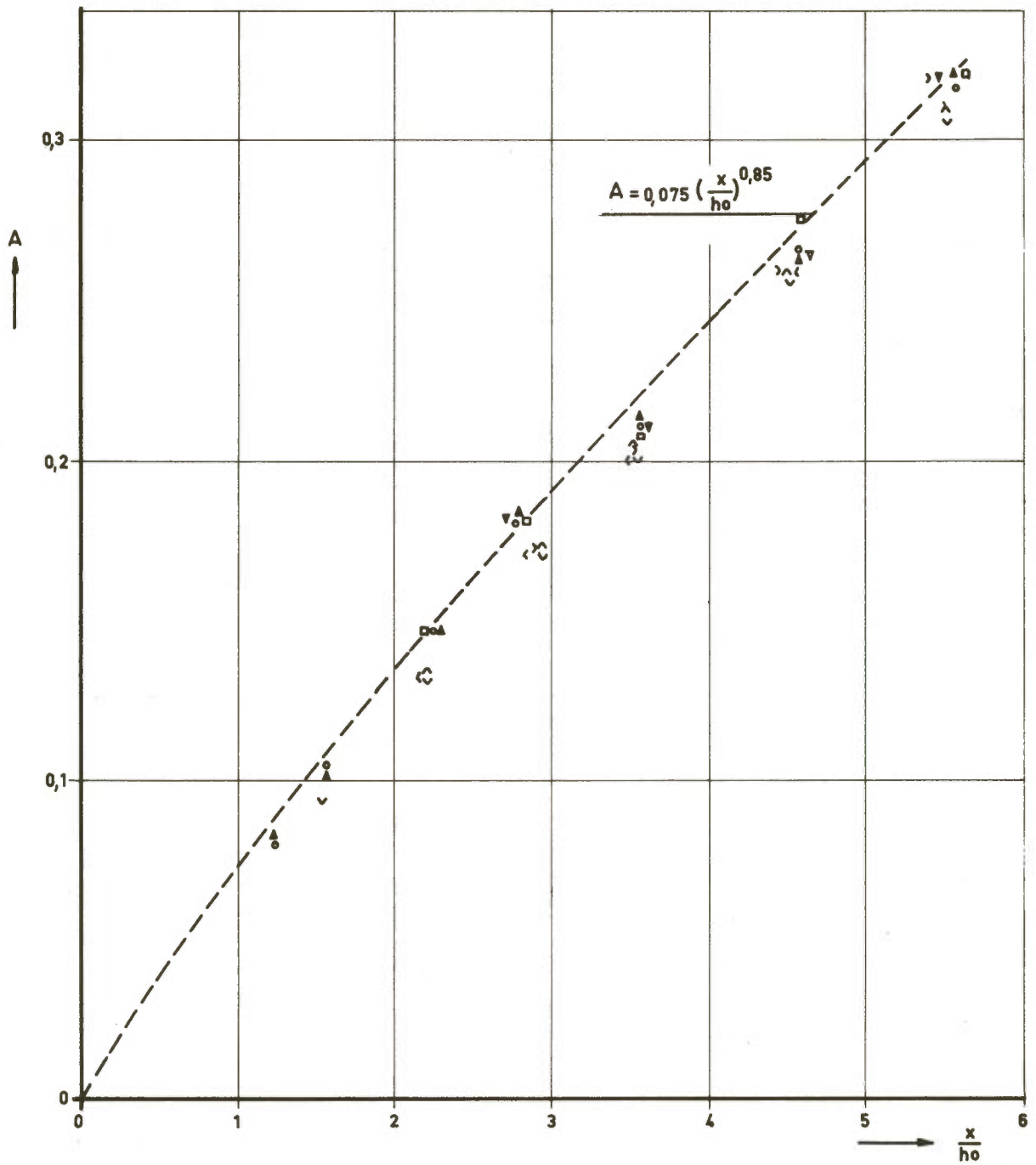
VERBAND TUSSEN A EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 30 \text{ cm}$        $B/h_0 = 1,67$

serie 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863

BJL. I-3



○	S8 - 30	q = 40	l/sec/m'	BAKELIET
▲	S8 - 27	q = 50	l/sec/m'	"
◻	S8 - 28	q = 60	l/sec/m'	"
▼	S8 - 29	q = 70	l/sec/m'	"
∇	S8 - 36	q = 24	l/sec/m'	PLASTIK
^	S8 - 34	q = 30	l/sec/m'	"
>	S8 - 35	q = 37,5	l/sec/m'	"
<	S8 - 37	q = 42	l/sec/m'	"

VERBAND TUSSEN A EN  $x/h_0$

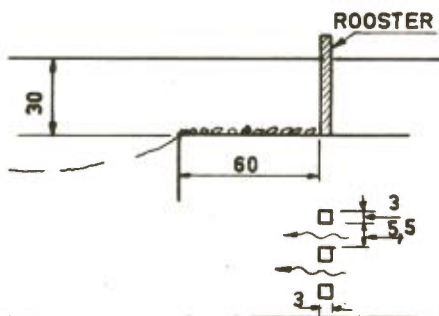
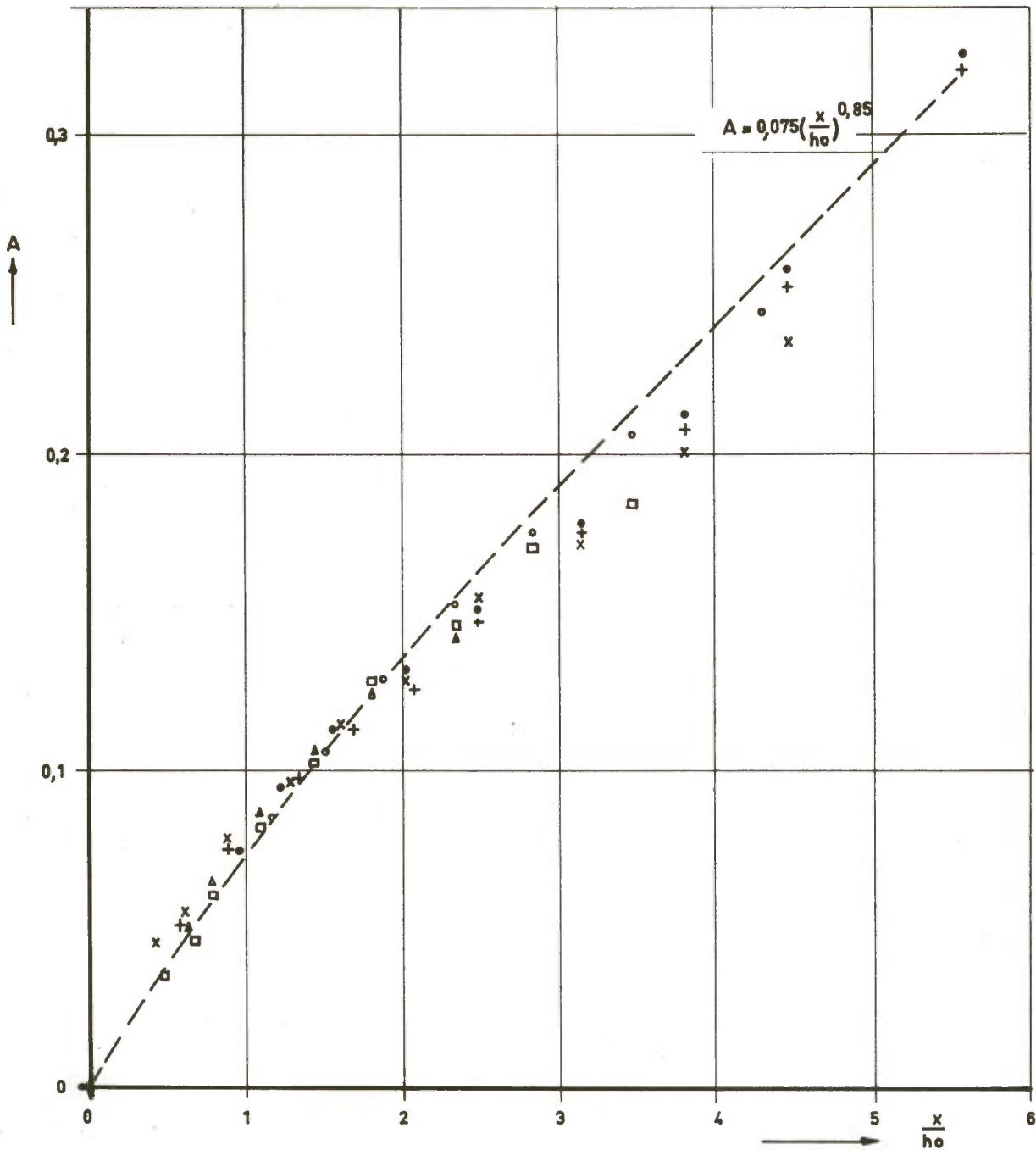
$h_0 = 15 \text{ cm}$        $B/h_0 = 3,33$

serie 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863

B'JL. I-4



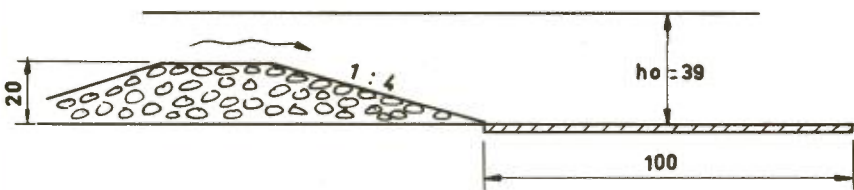
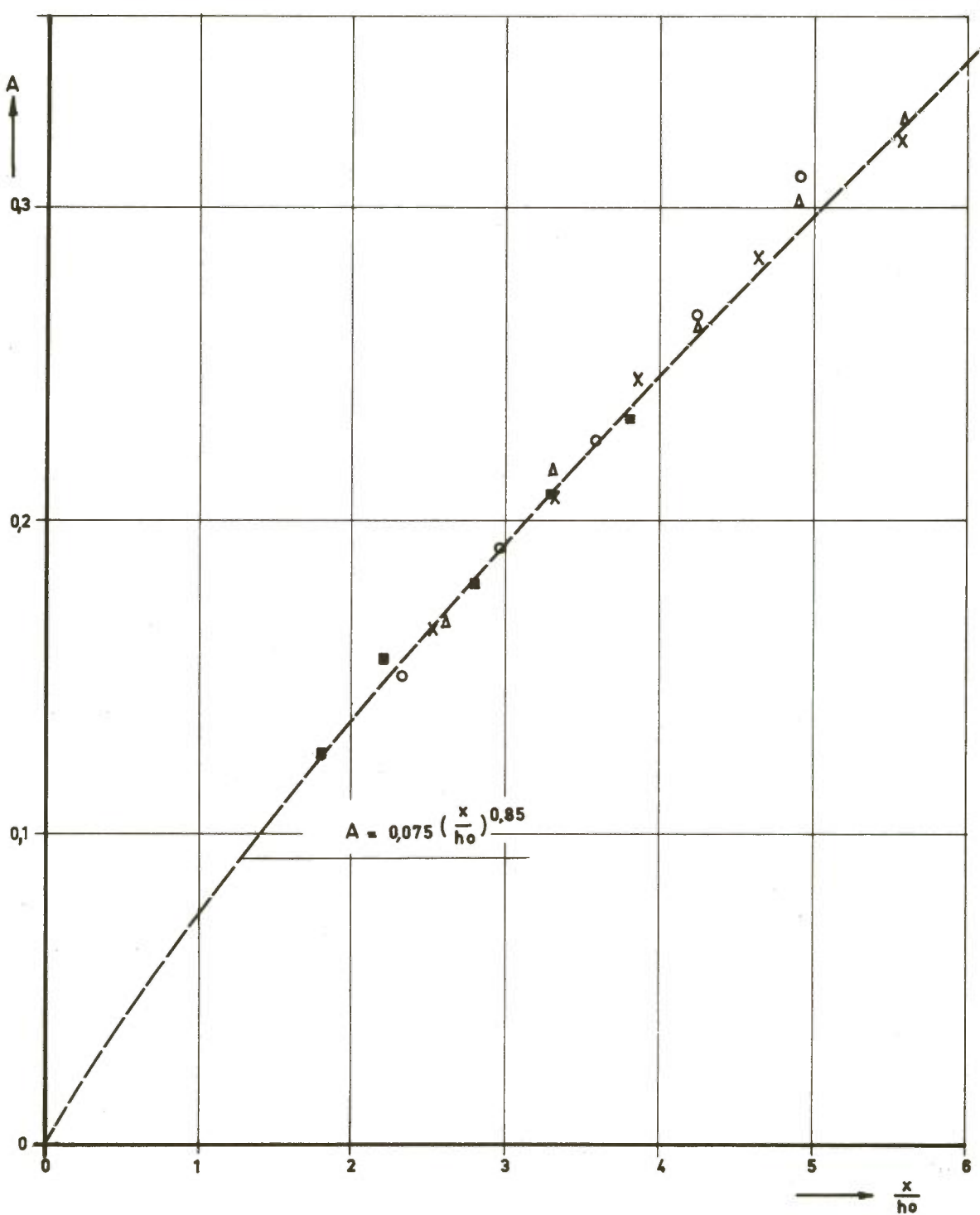
- x S12 - 2 q = 140 l/sec/m<sup>2</sup>. ZAND
- + S12 - 1 q = 160 l/sec/m<sup>2</sup>. "
- o S12 - 3 q = 180 l/sec/m<sup>2</sup>. "
- △ S12 - 6 q = 90 l/sec/m<sup>2</sup>. BAKELIET
- S12 - 4 q = 100 l/sec/m<sup>2</sup>. "
- o S12 - 5 q = 120 l/sec/m<sup>2</sup>. "

maten in cm

VERBAND TUSSEN A EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 30 \text{ cm}$        $B/h_0 = 1,67$

serie 3





maten in cm

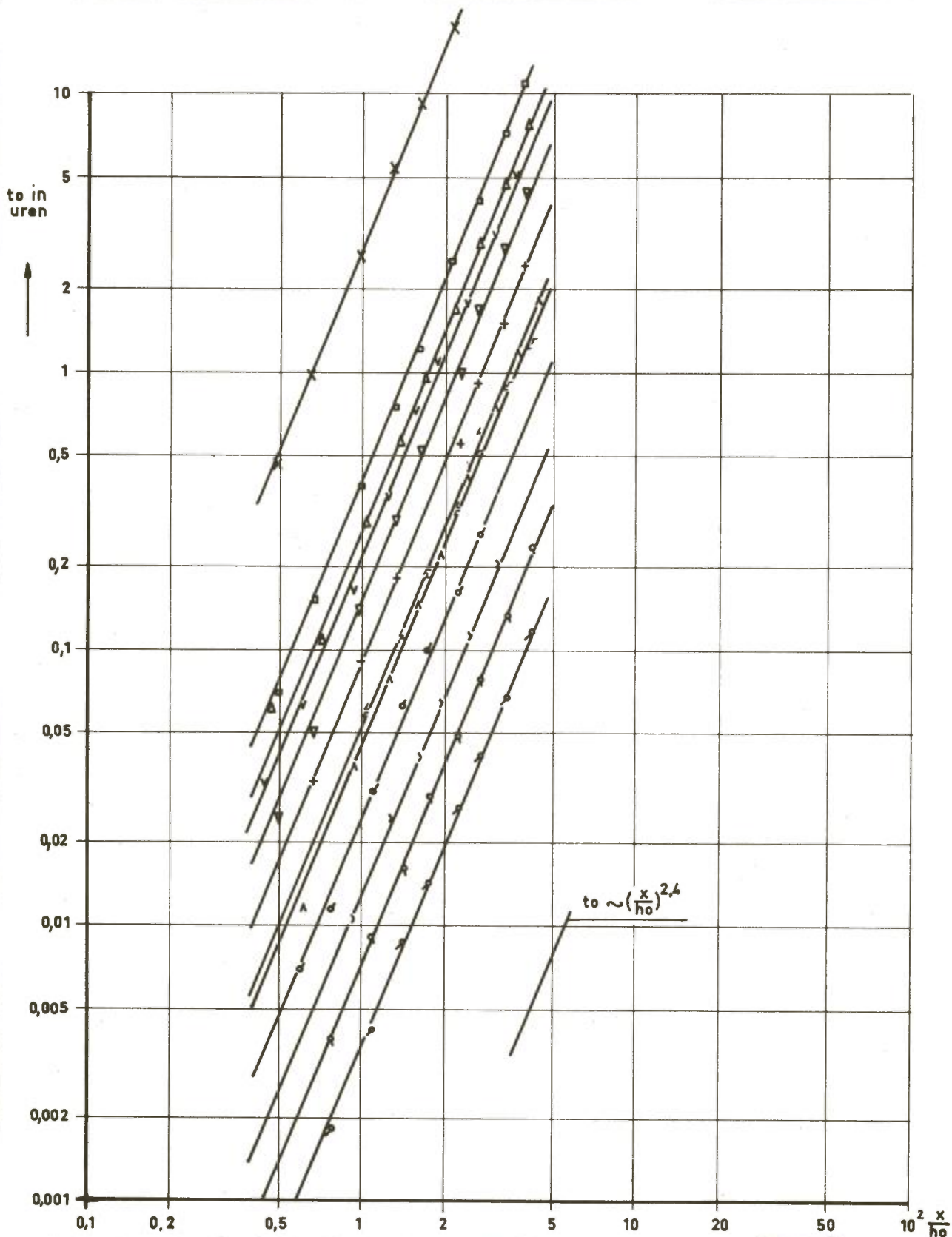
- X  $n_v = 7,1$   $q = 65$  l/sec/m' PLASTIK
- Δ  $n_v = 6$   $q = 77$  l/sec/m' "
- O  $n_v = 5$   $q = 92$  l/sec/m' "
- $n_v = 3,5$   $q = 130$  l/sec/m' BAKELIET

VERBAND TUSSEN A EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 39$  cm       $B/h_0 = 3,77$

serie 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

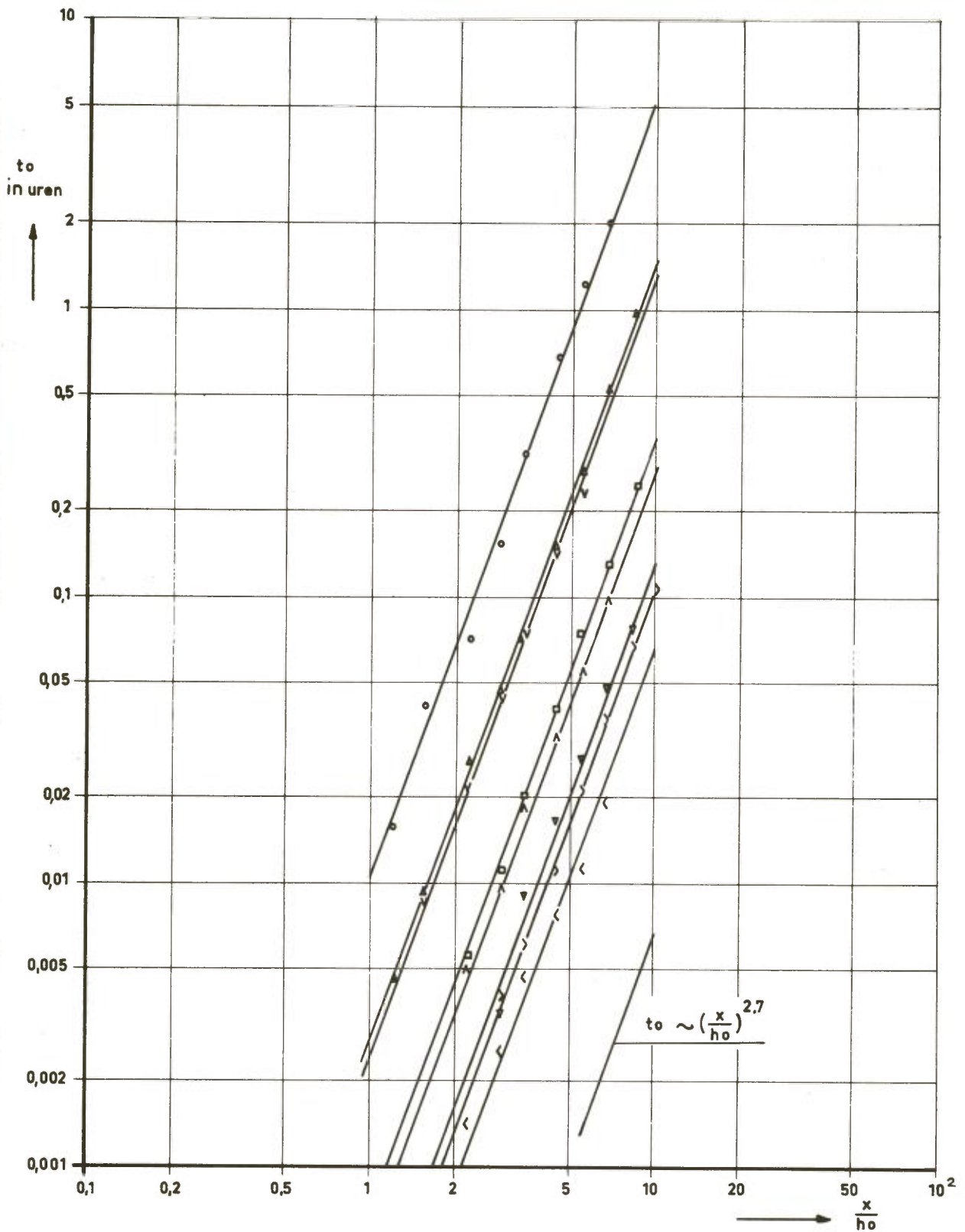
M.648/863 B'JL. I-6



- |                              |                                 |                                |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| X S8-20 q= 100 l/sec/m' ZAND | ∠ S8-10 q=160 l/sec/m' ZAND     | q S8-31 q= 60 l/sec/m' PLASTIK |
| □ S8-21 q= 120 l/sec/m' "    | "                               | ∩ S8-33 q= 70 l/sec/m' "       |
| △ S8-13 q= 130 l/sec/m' "    | v S8-24 q= 80 l/sec/m' BAKELIET | ∪ S8-32 q= 50 l/sec/m' "       |
| ▽ S8-22 q= 140 l/sec/m' "    | ∧ S8-25 q=100 l/sec/m' "        |                                |
| + S8-23 q= 150 l/sec/m' "    | > S8-26 q=120 l/sec/m' "        |                                |
| ∩ S8-14 q= 160 l/sec/m' "    |                                 |                                |

VERBAND TUSSEN  $t_0$  EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 30$  cm       $B/h_0 = 1,67$

serie 1	
M.648/863	BJL. I-7



v S8 - 36	q = 24	l/sec/m <sup>2</sup>	PLASTIK	o S8 - 30	q = 40	l/sec/m <sup>2</sup>	BAKELIET
^ S8 - 34	q = 30	l/sec/m <sup>2</sup>	"	^ S8 - 27	q = 50	l/sec/m <sup>2</sup>	"
> S8 - 35	q = 17,5	l/sec/m <sup>2</sup>	"	□ S8 - 28	q = 60	l/sec/m <sup>2</sup>	"
< S8 - 36	q = 42	l/sec/m <sup>2</sup>	"	v S8 - 29	q = 70	l/sec/m <sup>2</sup>	"

VERBAND TUSSEN  $t_o$  EN  $x/h_o$

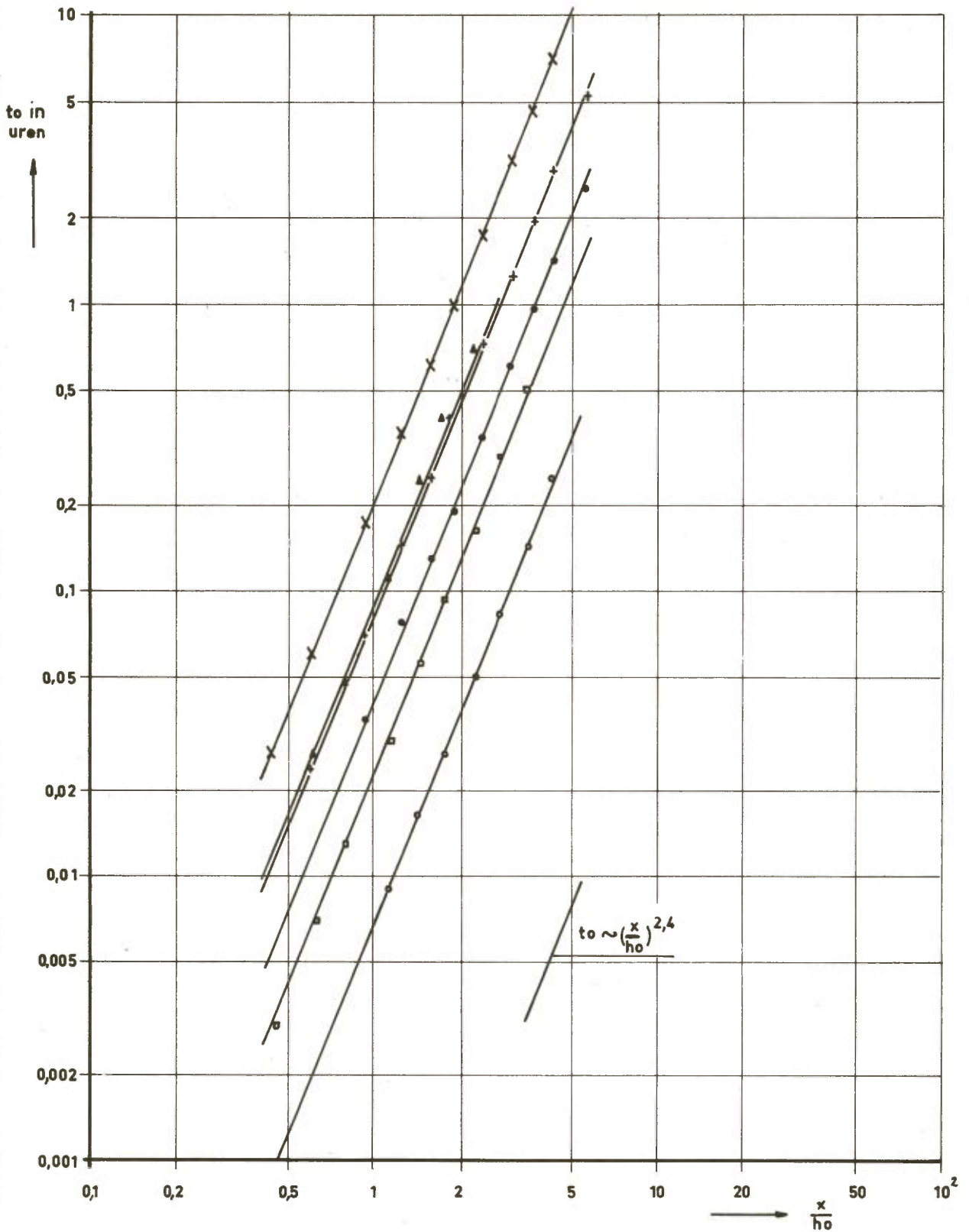
$h_o = 15$  cm       $B/h_o = 3,33$

serie 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 648/863 B'JL. I-8





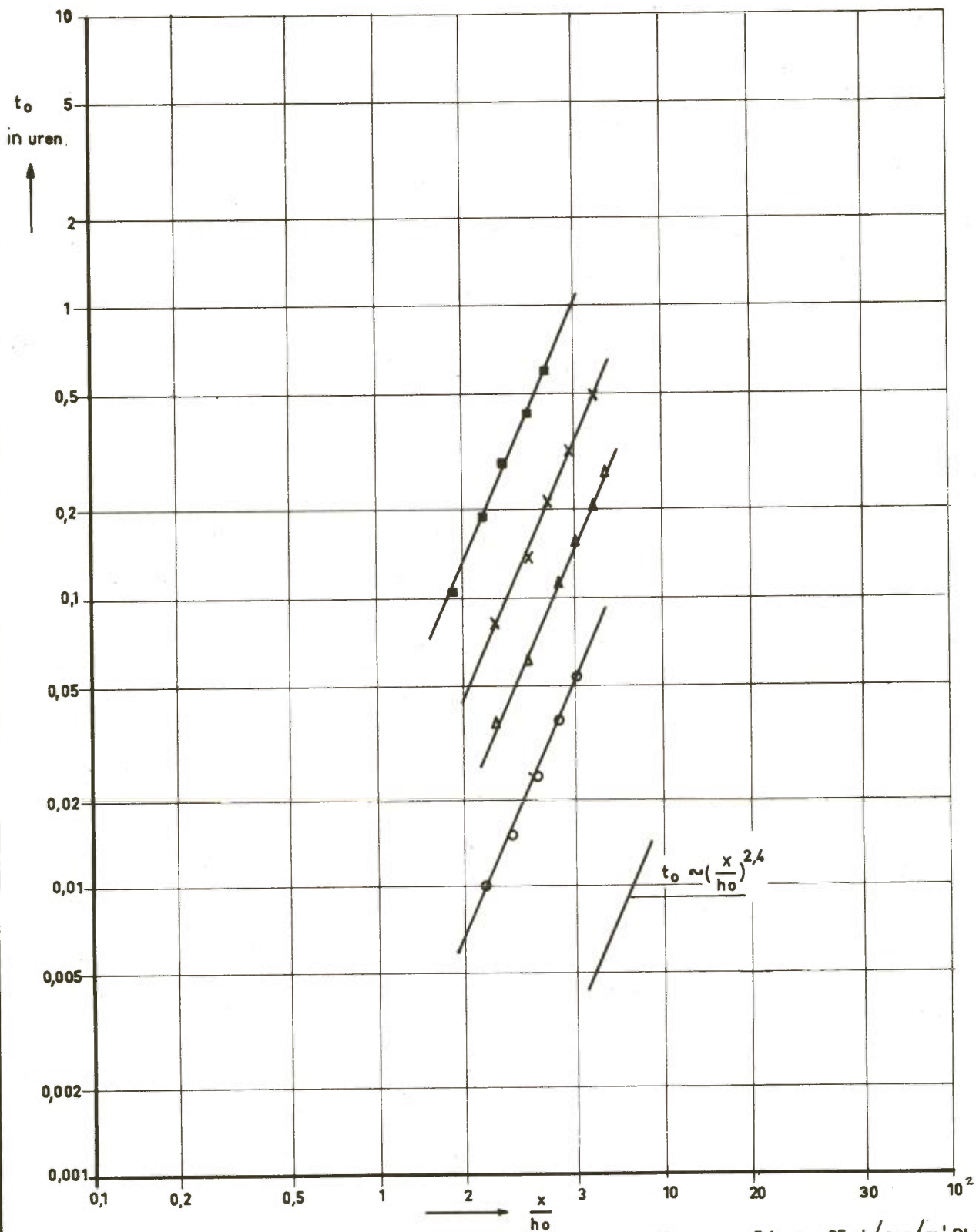
- |           |                       |           |                          |
|-----------|-----------------------|-----------|--------------------------|
| + S12 - 1 | q = 160 l/sec/m' ZAND | ▲ S12 - 6 | q = 80 l/sec/m' BAKELIET |
| X S12 - 3 | q = 180 l/sec/m' "    | □ S12 - 4 | q = 100 l/sec/m' "       |
| • S12 - 2 | q = 140 l/sec/m' "    | ◦ S12 - 5 | q = 100 l/sec/m' "       |

VERBAND TUSSEN  $t_0$  EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 30\text{cm}$        $B/h_0 = 1,67$

serie 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

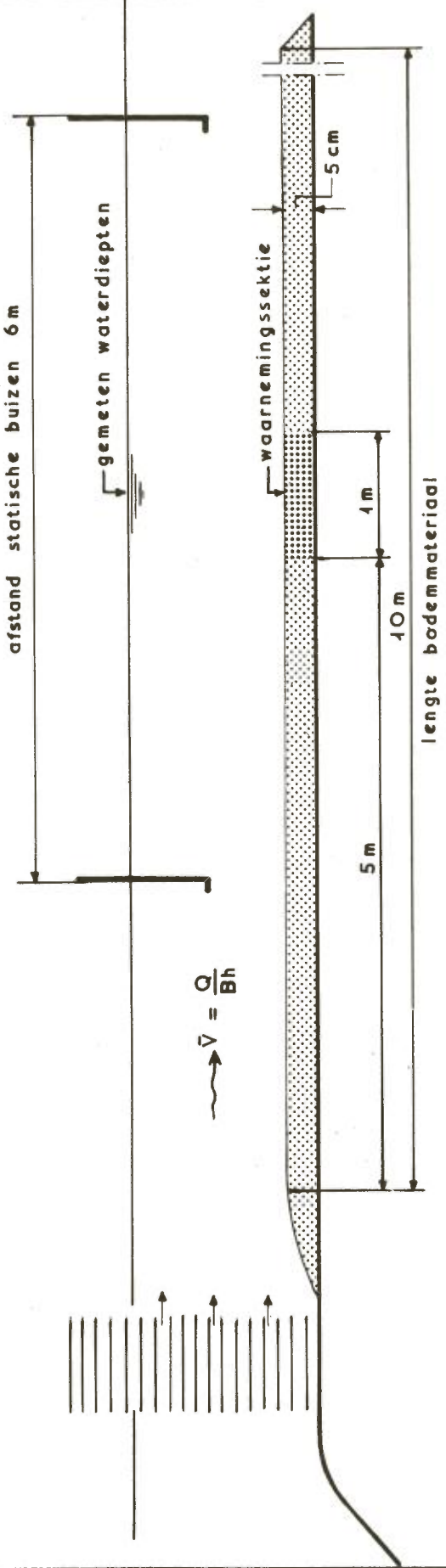
M.648/863 B.J.L. I-9



- X  $n_v = 7,1$   $q = 65$  l/sec/m' PLASTIK
- Δ  $n_v = 6$   $q = 77$  l/sec/m' "
- $n_v = 5$   $q = 92$  l/sec/m' "
- $n_v = 3,5$   $q = 130$  l/sec/m' BAKELIET

VERBAND TUSSEN  $t_0$  EN  $x/h_0$   
 $h_0 = 39$  cm       $B/h_0 = 3,77$

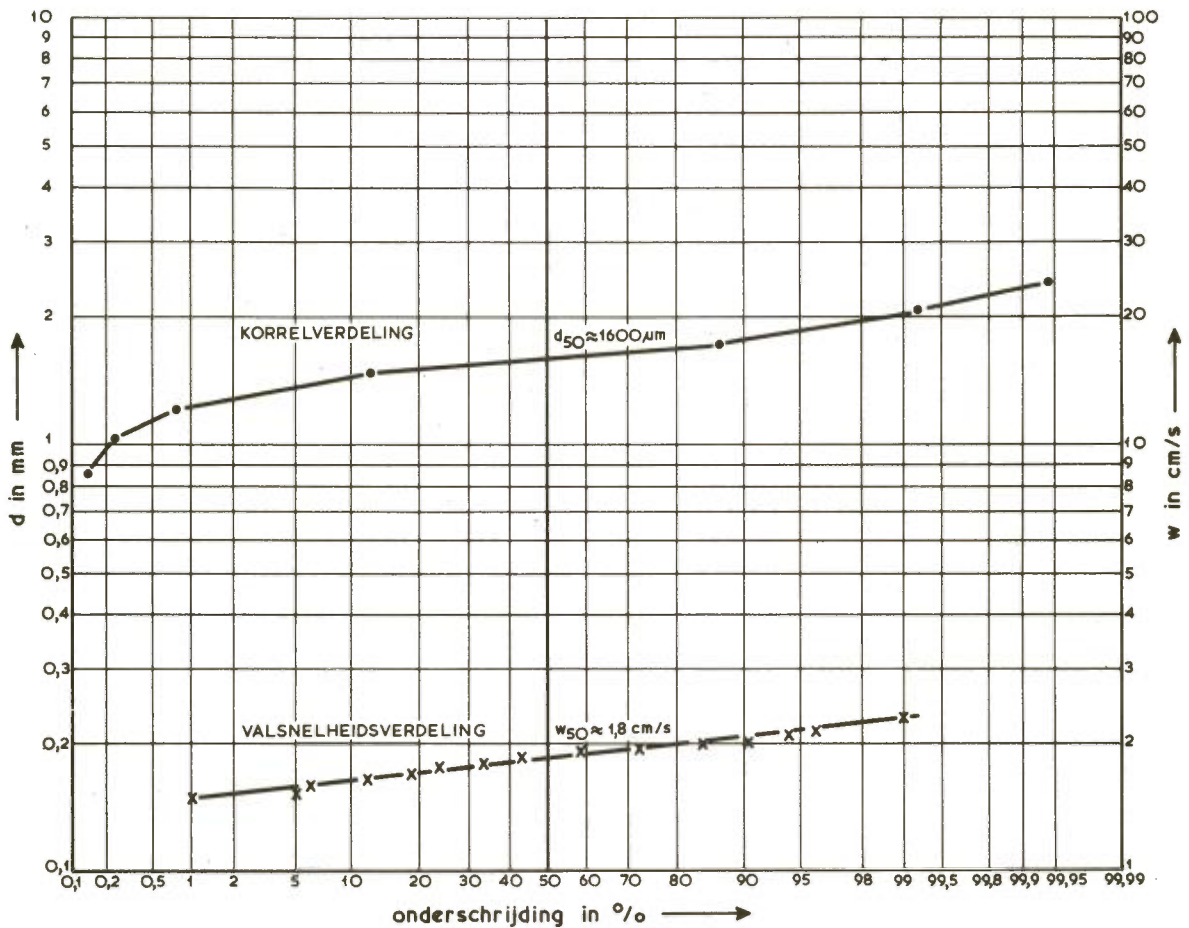
serie 4



gootlengte = 16 m  
 gootbreedte = 0,50 m

MEETOPSTELLING BIJ DE PROEVEN  
 TER BEPALING VAN HET BEGIN VAN BEWEGING





Polystyreen  $d_{50} = 1600 \mu\text{m}$ , temp. water:  $10^{\circ}\text{C} \rightarrow \nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

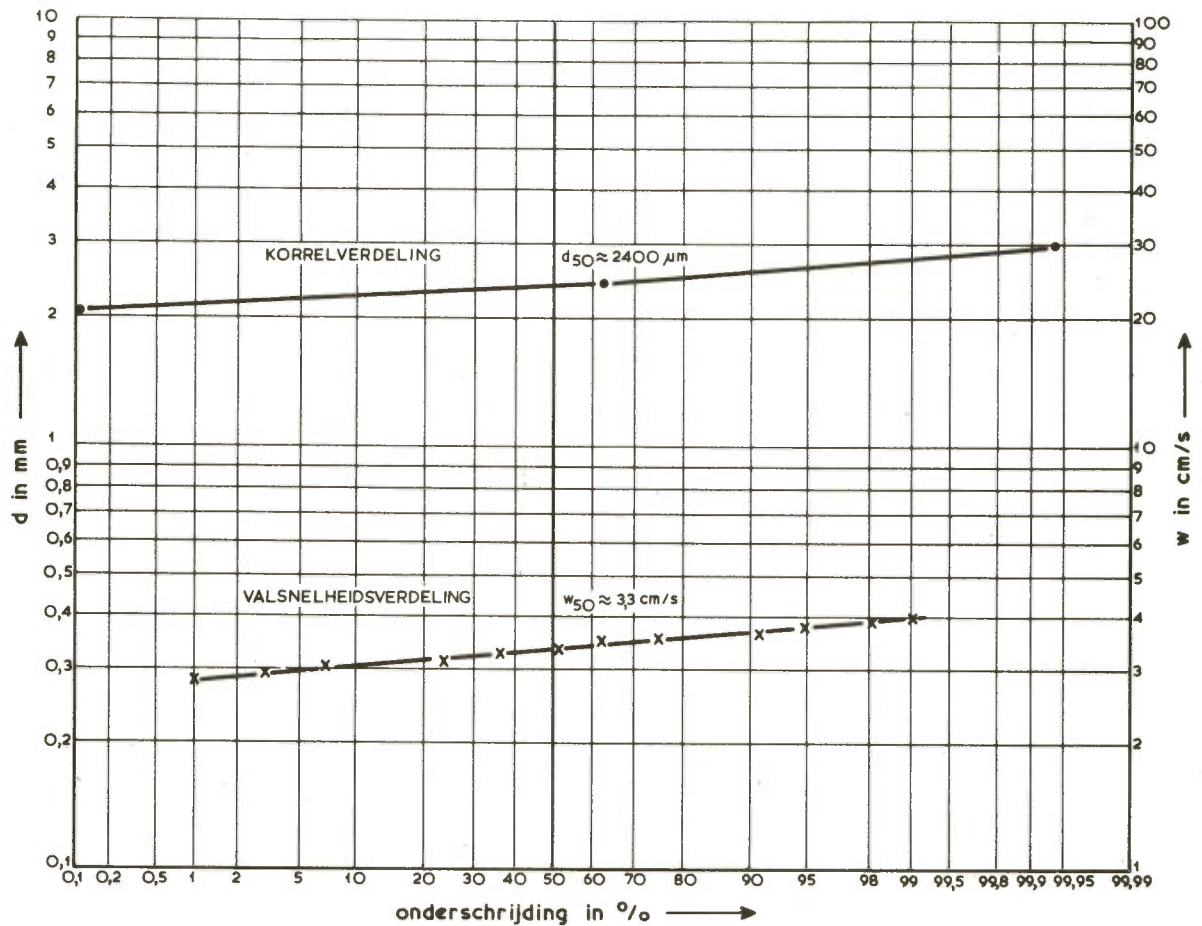
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	29,8	7,05	$0,50 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-2}$	$3,05 \cdot 10^{-2}$	0,28
2	29,7	7,74	0,66	2,26	3,03	0,32
3	29,6	8,10	0,83	2,24	3,02	0,36
4	29,5	8,46	1,16	2,22	3,00	0,42
5	29,5	8,80	1,50	2,20	2,99	0,48
6	29,4	9,18	1,67	2,18	2,98	0,51
7	29,4	9,53	2,00	2,17	2,98	0,56
1	20,2	7,44	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	$3,04 \cdot 10^{-2}$	0,40
2	20,1	7,95	1,50	2,45	3,02	0,42
3	20,0	8,50	1,67	2,41	3,00	0,45
4	19,9	9,05	1,84	2,38	2,99	0,47
5	19,8	9,60	2,00	2,35	2,98	0,49
6	19,7	10,10	2,33	2,33	2,97	0,52
7	19,7	10,70	2,83	2,31	2,95	0,58
1	15,0	6,68	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-2}$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	0,36
2	14,9	7,40	1,50	2,68	3,07	0,38
3	14,8	8,10	1,67	2,62	3,05	0,40
4	14,7	8,83	2,00	2,56	3,04	0,44
5	14,7	9,53	2,50	2,53	3,02	0,49
6	14,6	10,28	2,83	2,48	3,00	0,52
7	14,5	11,00	3,17	2,45	2,99	0,55

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

polystyreen-1600  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BJL.I-12



Polystyreen  $d_{50} = 2400 \mu\text{m}$ , temp. water:  $16^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

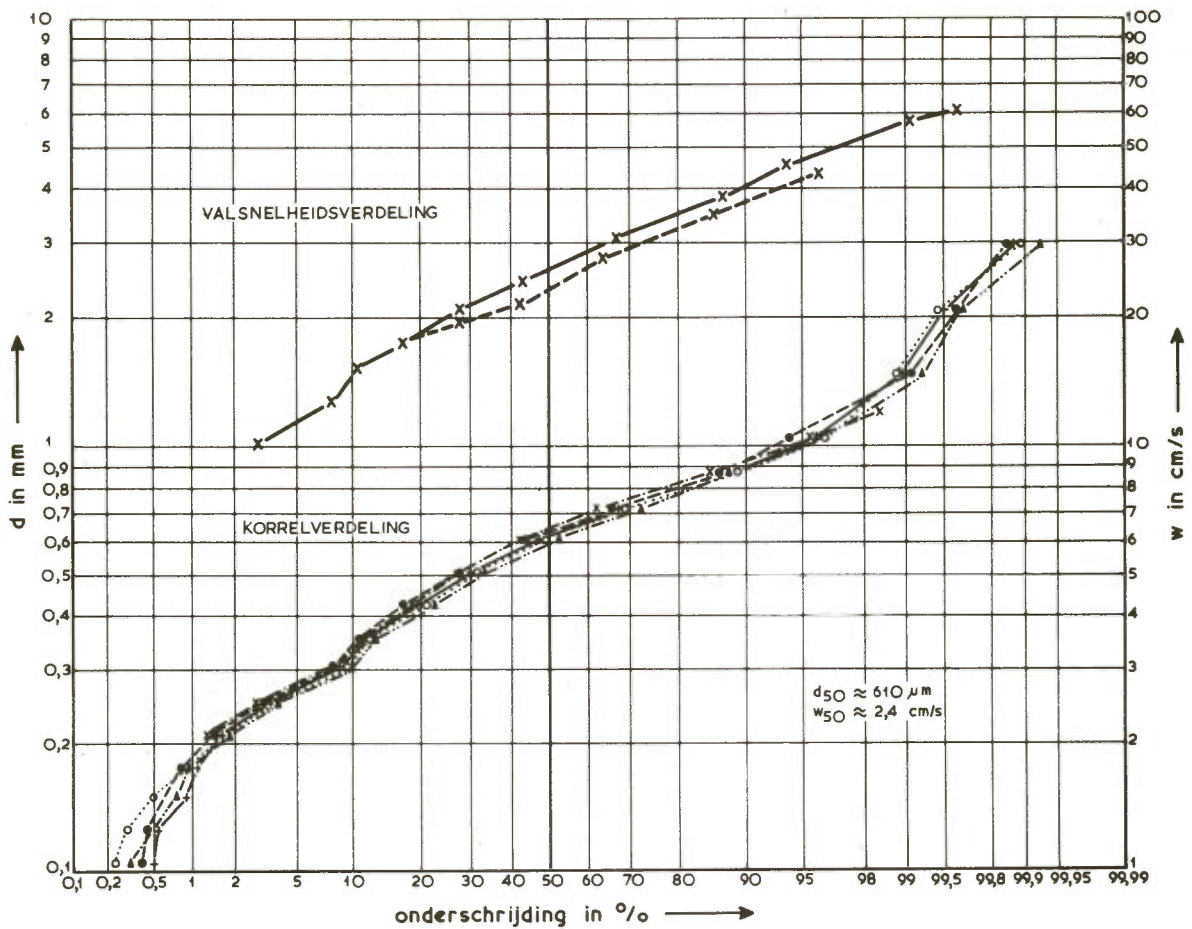
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	30,85	7,1	$0,67 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$3,17 \cdot 10^{-2}$	0,33
2	30,7	7,9	1,11	2,17	3,15	0,42
3	30,55	8,7	1,56	2,13	3,13	0,50
4	30,4	9,5	1,78	2,09	3,12	0,54
5	30,3	10,0	2,22	2,07	3,11	0,60
6	30,2	10,7	2,55	2,05	3,10	0,65
7	30,1	11,4	2,88	2,03	3,09	0,69
1	26,25	6,9	$0,67 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-2}$	$3,15 \cdot 10^{-2}$	0,31
2	26,15	8,1	1,11	2,23	3,12	0,40
3	26,05	8,8	1,56	2,20	3,11	0,48
4	26,95	9,8	2,00	2,15	3,09	0,54
5	25,85	10,5	2,44	2,12	3,08	0,60
6	25,80	11,2	2,88	2,09	3,07	0,65
7	25,75	11,9	3,33	2,07	3,06	0,70
1	18,1	6,5	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-2}$	0,39
2	18,0	7,2	1,78	2,49	3,16	0,45
3	17,9	8,1	2,00	2,41	3,15	0,48
4	17,7	9,3	2,44	2,35	3,13	0,53
5	17,6	10,3	3,11	2,31	3,12	0,59
6	17,5	11,1	3,77	2,27	3,11	0,65
7	17,4	12,1	4,66	2,24	3,10	0,73

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

polystyreen-2400  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BJL.I-13



Fijn bakeliet  $d_{50} = 610 \mu\text{m}$ , temp. water:  $17^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	26,55	16,6	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	0,69
2	26,45	17,5	3,82	1,88	2,32	0,73
3	26,35	18,4	4,18	1,87	2,31	0,76
4	26,2	19,5	4,54	1,86	2,30	0,79
5	26,1	20,3	4,91	1,85	2,28	0,82
6	26,0	21,2	5,27	1,84	2,27	0,85
7	25,9	21,8	5,81	1,83	2,26	0,89
1	20,2	14,9	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	0,58
1	20,05	16,5	3,45	2,04	2,36	0,63
2	19,95	17,2	4,18	2,02	2,34	0,69
3	19,85	18,6	4,72	2,00	2,32	0,74
4	19,75	19,4	5,09	1,98	2,31	0,77
5	19,7	20,0	5,64	1,96	2,30	0,81
6	19,6	20,9	6,18	1,94	2,29	0,84
7	19,5	21,9	6,72	1,92	2,28	0,88
1	16,4	15,6	$3,08 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-2}$	0,56
2	16,35	16,1	3,82	2,11	2,41	0,62
3	16,25	17,2	4,54	2,09	2,40	0,68
4	16,15	18,3	5,27	2,07	2,39	0,73
5	16,05	19,0	6,00	2,06	2,38	0,78
6	15,95	20,0	6,72	2,04	2,36	0,82
7	15,8	21,3	7,26	2,03	2,34	0,85

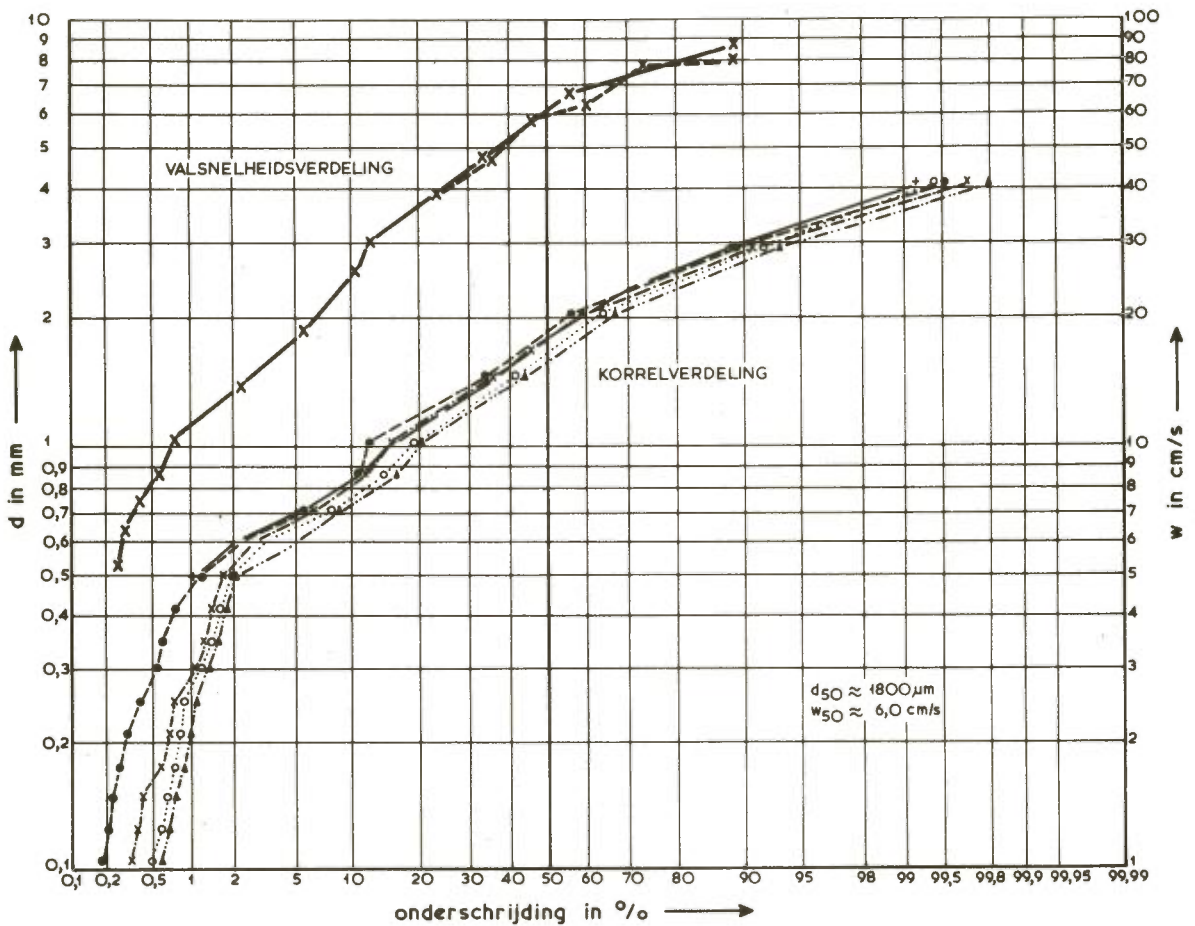
STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

bakeliet - 610  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BUL. I-14





Grof bakeliet  $d_{50} = 1800 \mu\text{m}$ , temp. water:  $15,6^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

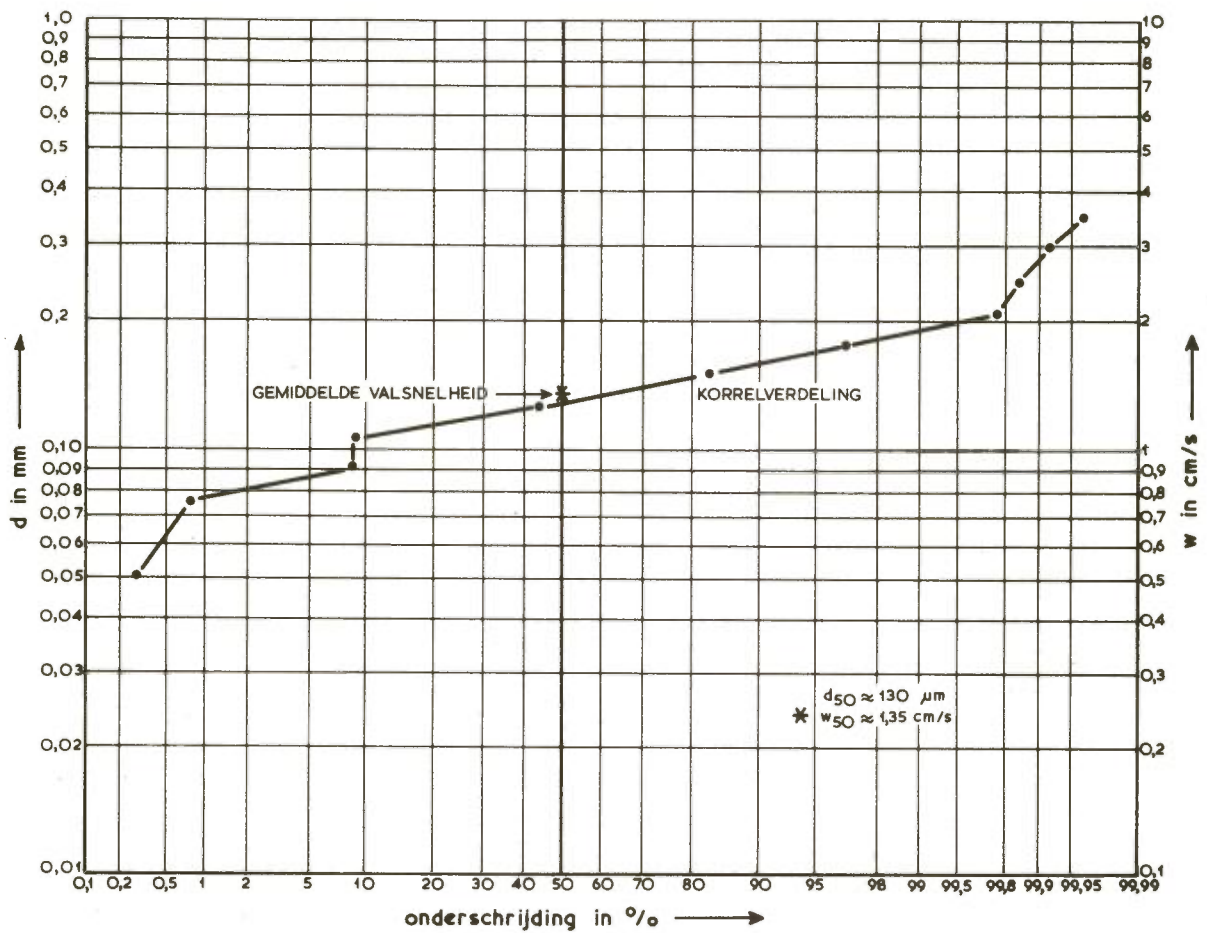
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	25,65	18,7	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	1,27
2	25,55	20,0	1,18	1,87	2,85	1,33
3	25,45	21,2	1,28	1,85	2,84	1,39
4	25,35	22,1	1,37	1,84	2,83	1,43
5	25,2	22,8	1,48	1,83	2,82	1,49
6	25,1	23,9	1,62	1,82	2,81	1,55
7	24,95	24,8	1,78	1,81	2,80	1,62
1	31,6	16,8	$0,65 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$2,87 \cdot 10^{-2}$	1,05
2	31,45	17,8	0,75	1,86	2,86	1,13
3	31,25	18,9	0,83	1,84	2,86	1,19
3	31,1	20,2	0,92	1,82	2,85	1,25
4	30,9	21,6	1,02	1,80	2,84	1,31
5	30,8	23,0	1,12	1,78	2,82	1,38
5	30,6	24,2	1,25	1,76	2,81	1,46
6	30,5	25,2	1,36	1,75	2,80	1,52
7	30,4	26,3	1,54	1,74	2,79	1,62
1	16,0	15,0	$0,97 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$3,01 \cdot 10^{-2}$	1,02
2	15,9	16,1	1,10	2,14	2,99	1,09
3	15,7	18,1	1,31	2,10	2,97	1,18
4	15,55	20,6	1,56	2,05	2,96	1,29
5	15,4	22,1	1,83	2,02	2,95	1,40
6	15,25	23,6	2,12	2,00	2,94	1,50
7	15,1	25,6	2,42	1,98	2,94	1,60

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

bakeliet - 1800  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BIJL. I-15



Zand  $d_{50} = 130 \mu\text{m}$ , temp. water:  $16,5^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

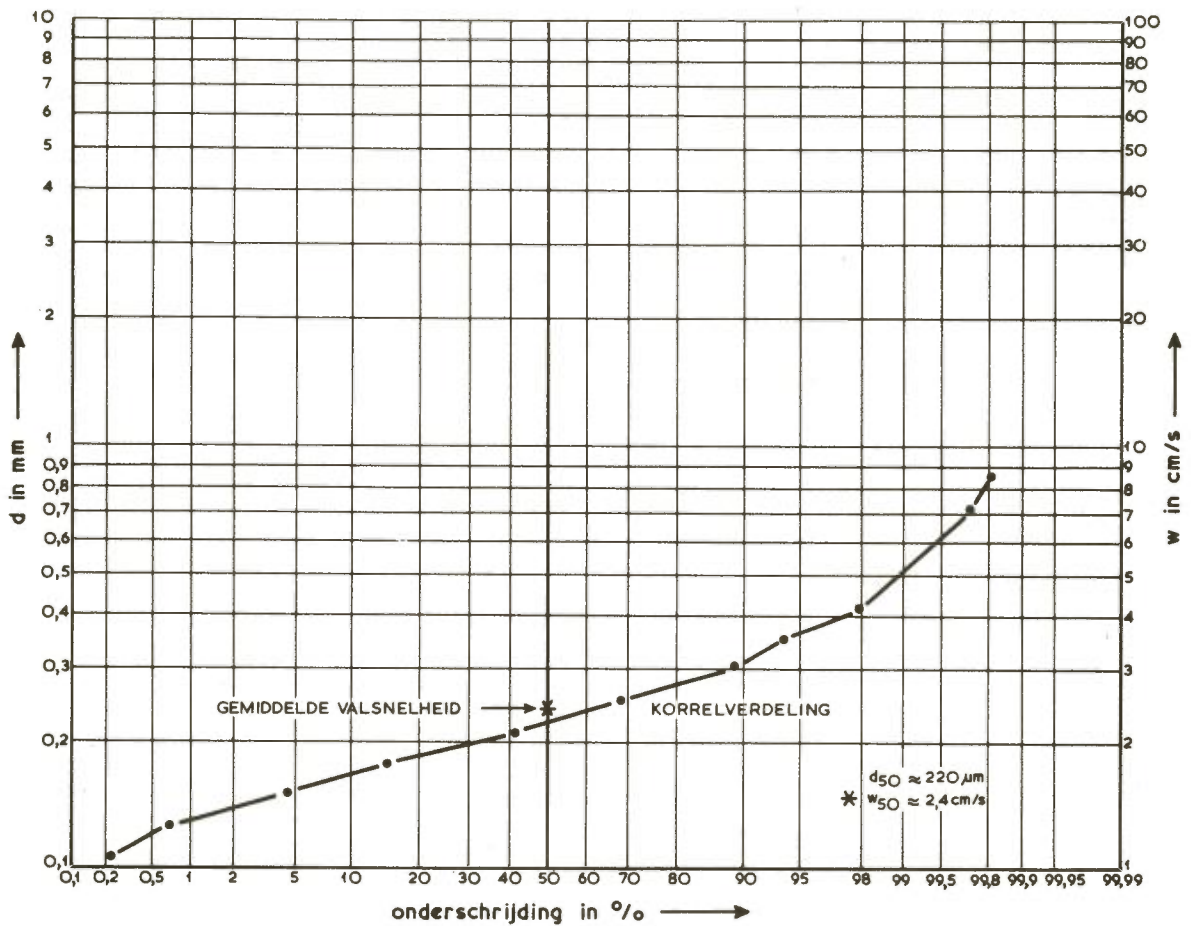
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	24,3	13,8	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	0,77
1	24,1	15,6	5,6	2,00	2,05	0,83
2	23,9	17,4	6,8	1,95	2,02	0,91
3	23,7	19,1	8,0	1,90	1,99	0,99
4	23,55	20,6	9,0	1,88	1,96	1,04
5	23,3	22,3	$1,06 \cdot 10^{-4}$	1,86	1,93	1,13
6	23,15	24,2	1,2	1,84	1,90	1,20
7	23,0	26,1	1,34	1,82	1,88	1,26
1	21,4	14,0	$4,85 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	0,74
1	21,2	15,6	5,12	2,04	2,04	0,76
2	21,0	17,1	6,75	2,01	2,01	0,87
3	20,9	19,1	8,45	1,97	1,97	0,97
4	20,75	20,7	9,9	1,93	1,93	1,05
5	20,6	22,3	$1,17 \cdot 10^{-4}$	1,90	1,90	1,14
6	20,5	24,4	1,33	1,87	1,88	1,21
7	20,3	26,6	1,47	1,85	1,86	1,27
1	16,3	15,3	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	0,81
2	16,15	17,3	8,3	2,10	2,07	0,89
3	16,05	18,7	9,7	2,07	2,05	0,96
4	15,9	20,1	$1,10 \cdot 10^{-4}$	2,05	2,04	1,02
5	15,75	22,2	1,33	2,02	2,02	1,12
6	15,6	23,7	1,62	2,00	1,99	1,24
7	15,5	25,2	1,75	1,98	1,97	1,28

STROOMKONDIETIES BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 130  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 BUL. I - 16



Zand  $d_{50} = 220 \mu\text{m}$ , temp. water:  $18^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	24,15	21,5	$0,96 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	1,10
2	24,05	22,8	1,07	1,84	2,02	1,16
3	23,9	24,2	1,18	1,82	2,00	1,22
4	23,7	26,1	1,38	1,79	1,98	1,31
5	23,5	28,1	1,54	1,77	1,96	1,39
6	23,4	29,5	1,71	1,76	1,94	1,47
7	23,3	30,9	1,84	1,75	1,93	1,51
1	28,3	20,8	$0,80 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	1,05
2	28,1	22,8	0,92	1,79	2,02	1,13
3	28,0	24,2	1,02	1,77	2,00	1,19
4	27,9	25,1	1,13	1,76	1,99	1,25
5	27,8	26,6	1,30	1,75	1,98	1,34
6	27,65	27,5	1,47	1,74	1,97	1,42
7	27,55	29,0	1,62	1,72	1,95	1,49
1	17,0	21,8	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	1,05
2	16,9	23,1	1,23	1,96	2,06	1,12
3	16,75	25,5	1,42	1,92	2,04	1,20
4	16,65	26,4	1,62	1,90	2,03	1,28
5	16,5	27,9	1,80	1,88	2,01	1,34
6	16,3	29,5	2,08	1,86	2,00	1,44
7	16,2	31,5	2,30	1,85	1,99	1,51

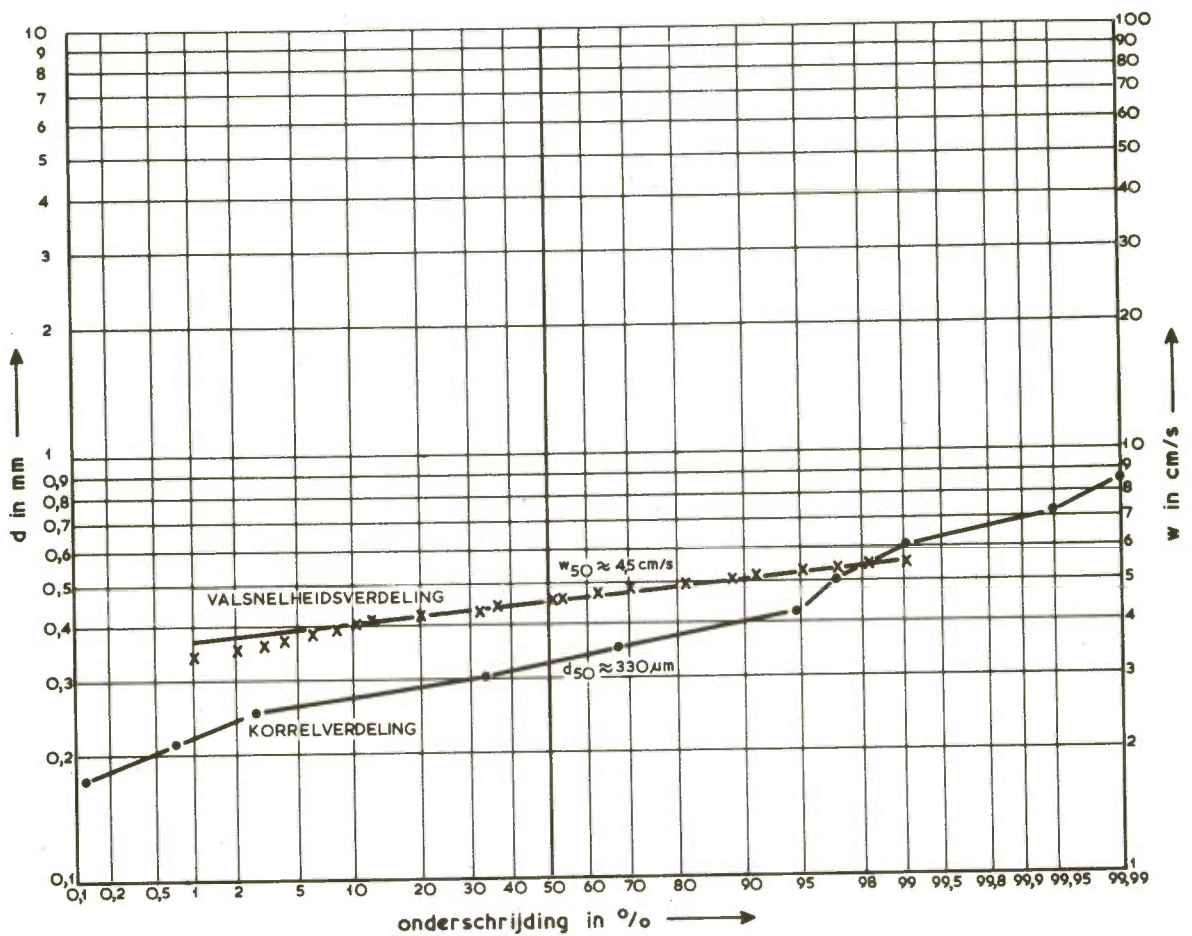
STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 220  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 BUL.I-17





Zand  $d_{50} = 330 \mu\text{m}$ , temp. water:  $15,5^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

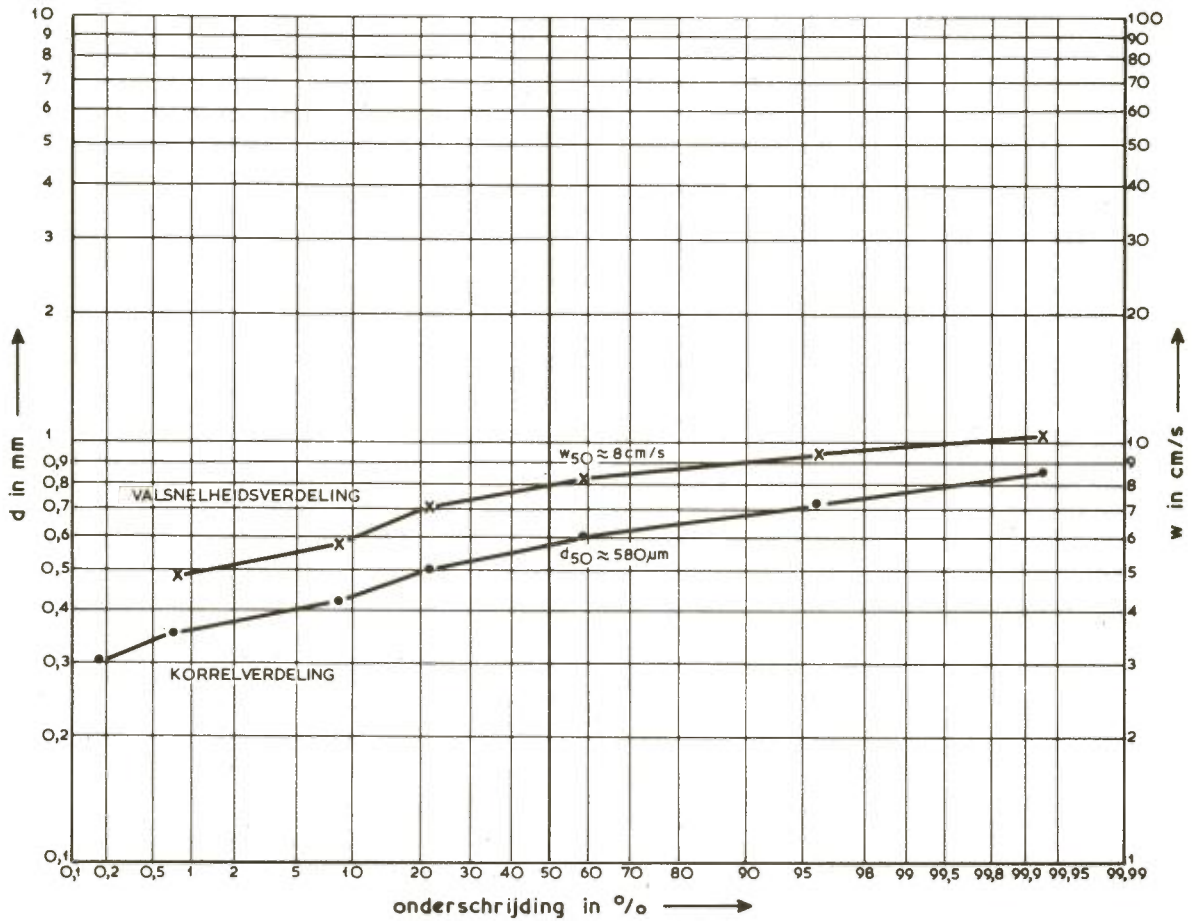
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	28,8	22,6	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	1,21
2	28,65	23,7	1,14	1,79	2,10	1,27
3	28,5	25,2	1,25	1,77	2,09	1,33
4	28,35	26,4	1,37	1,76	2,07	1,40
5	28,25	27,6	1,48	1,75	2,06	1,44
6	28,1	29,2	1,61	1,74	2,05	1,51
7	27,95	30,4	1,73	1,73	2,04	1,56
1	23,0	22,2	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	1,16
2	22,8	24,1	1,27	1,85	2,09	1,25
3	22,7	25,5	1,40	1,84	2,08	1,32
4	22,6	26,6	1,53	1,82	2,07	1,38
5	22,45	28,4	1,67	1,80	2,06	1,44
6	22,3	29,6	1,83	1,79	2,05	1,50
7	22,2	30,7	1,96	1,78	2,04	1,55
1	16,2	21,2	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	1,08
2	16,05	23,0	1,33	2,01	2,15	1,15
3	15,95	24,4	1,52	1,99	2,14	1,22
4	15,85	26,5	1,73	1,96	2,12	1,30
5	15,7	28,0	1,95	1,93	2,11	1,38
6	15,55	30,0	2,24	1,90	2,09	1,48
7	15,4	31,1	2,56	1,89	2,08	1,57

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 330  $\mu$ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 BJL.I - 18



Zand  $d_{50} = 580 \mu\text{m}$ , temp. water:  $21,4^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 0,975 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

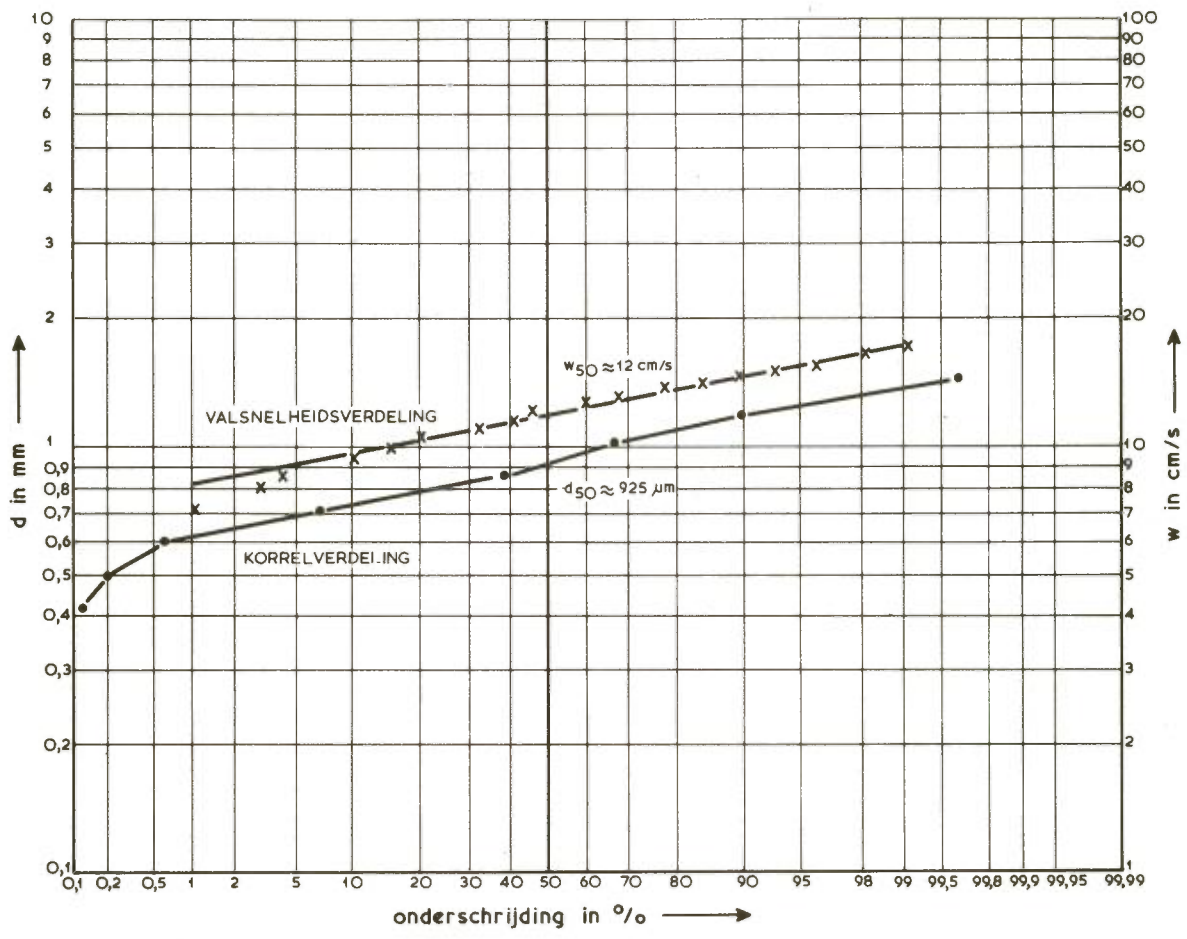
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	25,8	26,4	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	1,17
2	25,7	28,0	1,20	1,73	2,16	1,29
3	25,5	29,8	1,47	1,71	2,15	1,42
4	25,4	31,5	1,63	1,69	2,14	1,50
5	25,3	33,2	1,80	1,68	2,14	1,57
6	25,25	34,4	1,96	1,67	2,13	1,65
7	25,15	35,8	2,13	1,66	2,12	1,71
1	22,1	28,0	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	1,22
2	21,95	29,6	1,43	1,76	2,24	1,35
3	21,8	31,2	1,65	1,75	2,23	1,44
4	21,7	32,7	1,83	1,73	2,22	1,52
5	21,6	34,2	1,98	1,72	2,22	1,59
6	21,5	35,4	2,16	1,71	2,21	1,65
7	21,4	36,4	2,33	1,70	2,21	1,71
1	15,85	27,8	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	1,22
2	15,7	29,3	1,67	1,86	2,46	1,32
3	15,6	30,8	2,00	1,85	2,45	1,44
4	15,5	32,2	2,20	1,84	2,45	1,51
5	15,4	33,8	2,42	1,82	2,44	1,58
6	15,3	35,3	2,65	1,81	2,44	1,65
7	15,2	36,8	2,85	1,80	2,43	1,71

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand -  $580 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BJL.I - 19



Zand  $d_{50} = 925 \mu\text{m}$ , temp. water:  $16,5^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_*$ (cm/s)
1	21,35	28,1	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	1,54
1	21,15	30,2	2,16	1,80	2,40	1,65
2	21,0	32,4	2,51	1,78	2,39	1,78
3	20,85	34,1	2,83	1,76	2,38	1,89
4	20,7	35,7	3,13	1,75	2,37	1,98
5	20,5	37,5	3,46	1,74	2,36	2,08
6	20,35	39,3	3,83	1,73	2,35	2,18
7	20,15	41,6	4,25	1,71	2,35	2,30
1	14,4	26,4	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	1,36
2	14,25	29,5	2,36	1,94	2,52	1,52
3	14,0	32,3	3,00	1,91	2,50	1,70
4	13,8	34,8	3,70	1,88	2,50	1,88
5	13,65	36,6	4,33	1,87	2,49	2,03
6	13,5	39,3	5,32	1,85	2,48	2,24
7	13,3	41,5	6,33	1,84	2,48	2,44

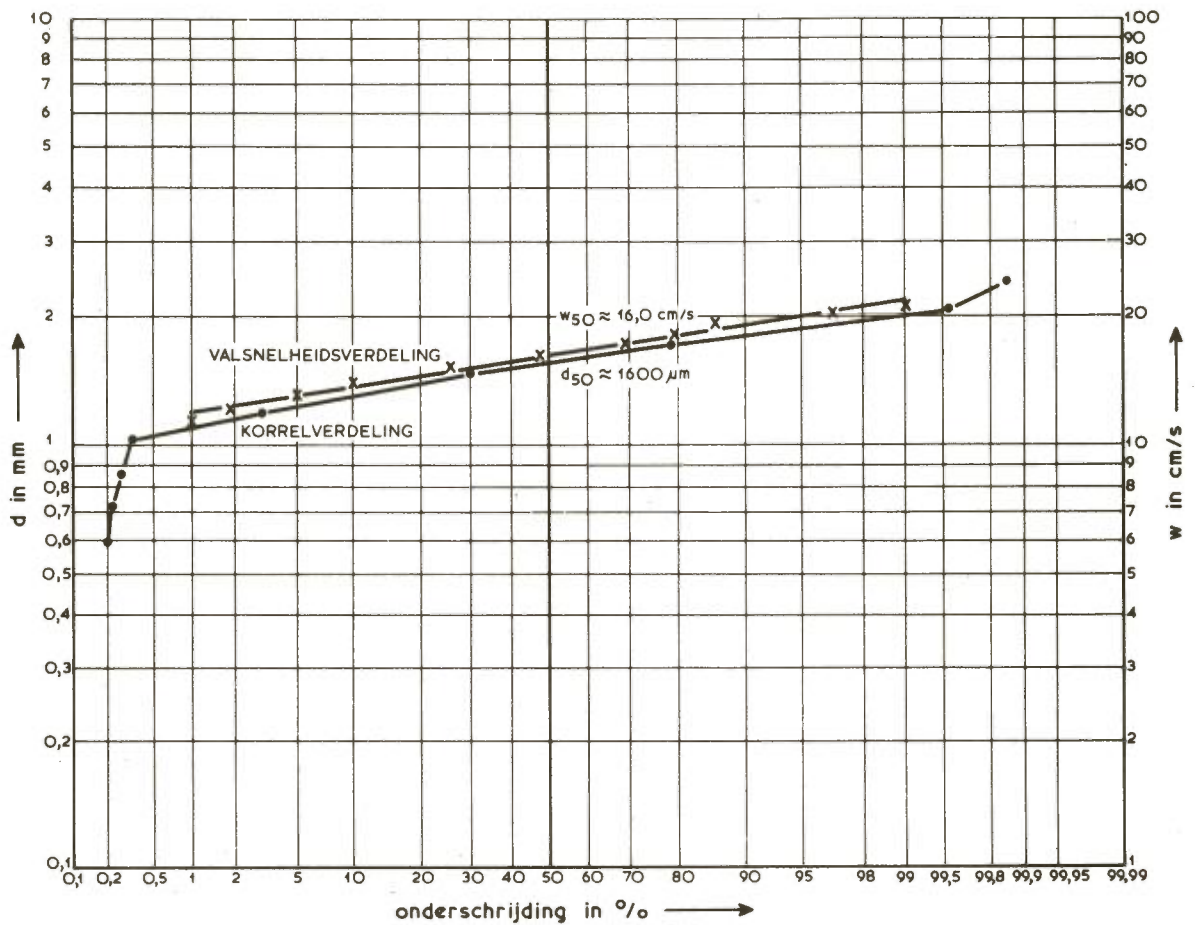
STROOMKONDIETES BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 925  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BUL.I - 20





Zand  $d_{50} = 1600 \mu\text{m}$ , temp. water:  $16,3^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

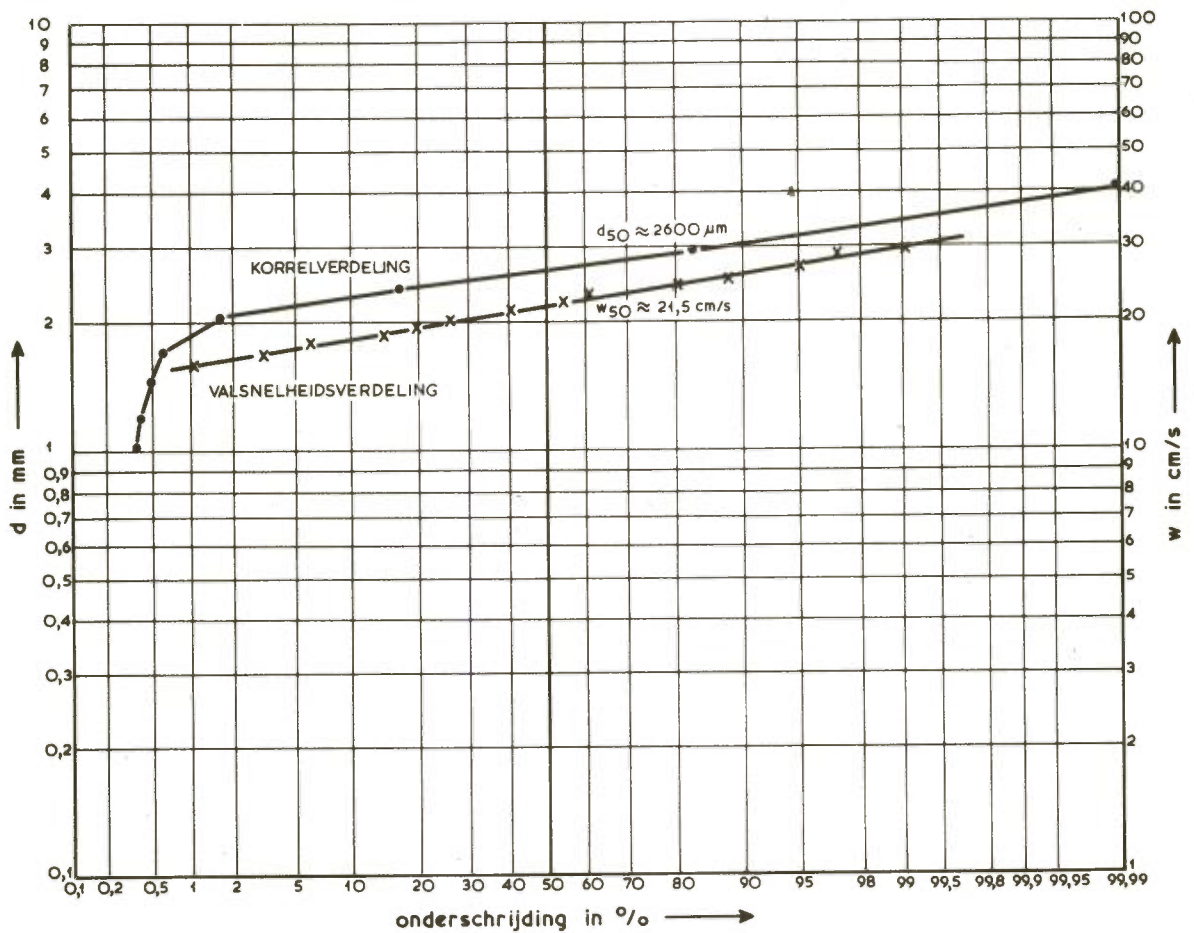
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_{*}$ (cm/s)
1	16,45	38,3	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	2,31
2	16,2	41,2	6,02	1,78	2,82	2,60
3	16,1	42,9	6,68	1,77	2,81	2,74
4	16,0	44,4	7,40	1,76	2,81	2,88
5	15,9	46,0	8,40	1,75	2,81	3,06
6	15,8	48,1	8,84	1,74	2,81	3,14
7	15,7	51,0	9,60	1,73	2,80	3,26
temp. water: $14,5^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$						
1	20,55	38,9	$4,18 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-2}$	2,34
2	20,4	41,2	4,63	1,73	2,71	2,50
3	20,15	44,6	5,81	1,71	2,70	2,76
4	20,0	46,5	6,25	1,70	2,70	2,85
5	19,7	48,7	6,81	1,69	2,70	2,97
6	19,5	51,5	7,45	1,68	2,70	3,10
7	19,35	53,8	8,35	1,67	2,69	3,27

STROOMKONDITIONS BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 1600  $\mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 BJL.I - 21



Zand  $d_{50} = 2600 \mu\text{m}$ , temp. water:  $20^\circ \text{C} \rightarrow \nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

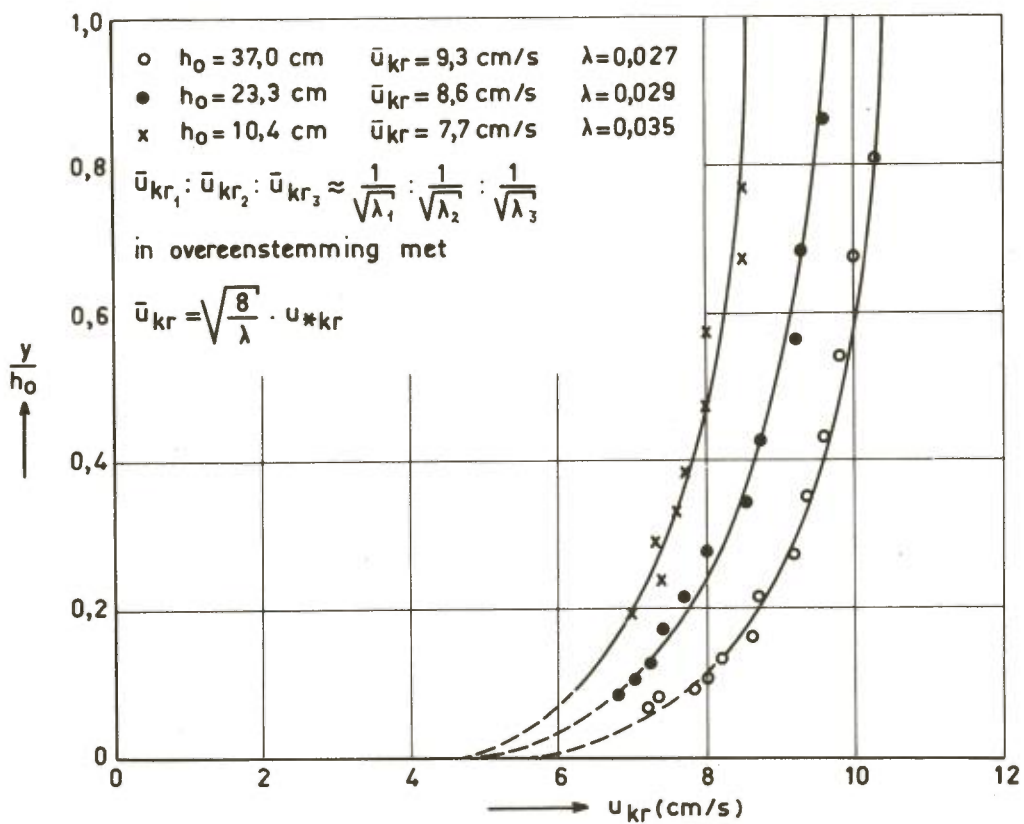
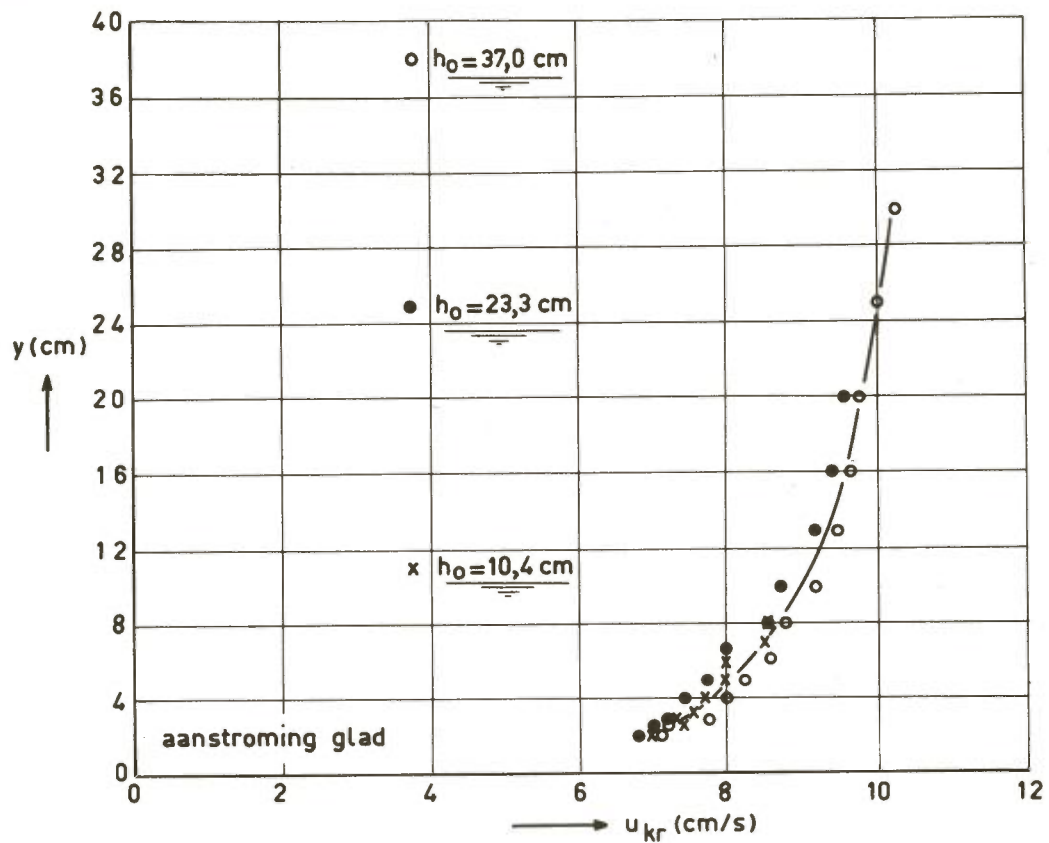
kriterium	h (cm)	$\bar{u}$ (cm/s)	I	$\lambda_w$	$\lambda_b$	$u_w$ (cm/s)
1	20,4	47,0	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$3,06 \cdot 10^{-2}$	3,26
2	20,2	50,5	0,88	1,64	3,05	3,49
3	20,0	54,5	1,12	1,62	3,05	3,92
4	19,8	58,0	1,38	1,61	3,05	4,35
5	19,5	61,0	1,53	1,60	3,05	4,55
6	19,3	63,7	1,70	1,59	3,05	4,78
7	19,1	67,0	1,95	1,58	3,05	5,11
1	15,55	47,6	$0,98 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$	3,34
2	15,2	52,0	1,21	1,71	3,12	3,68
3	15,05	55,1	1,45	1,69	3,12	4,02
4	14,95	57,5	1,72	1,68	3,12	4,37
5	14,65	60,0	2,03	1,68	3,12	4,71
6	14,4	62,5	2,32	1,67	3,12	5,00
7	14,2	64,8	2,60	1,66	3,12	5,26

STROOMKONDIETIES BIJ BEGIN VAN BEWEGING

zand - 2600  $\mu\text{m}$

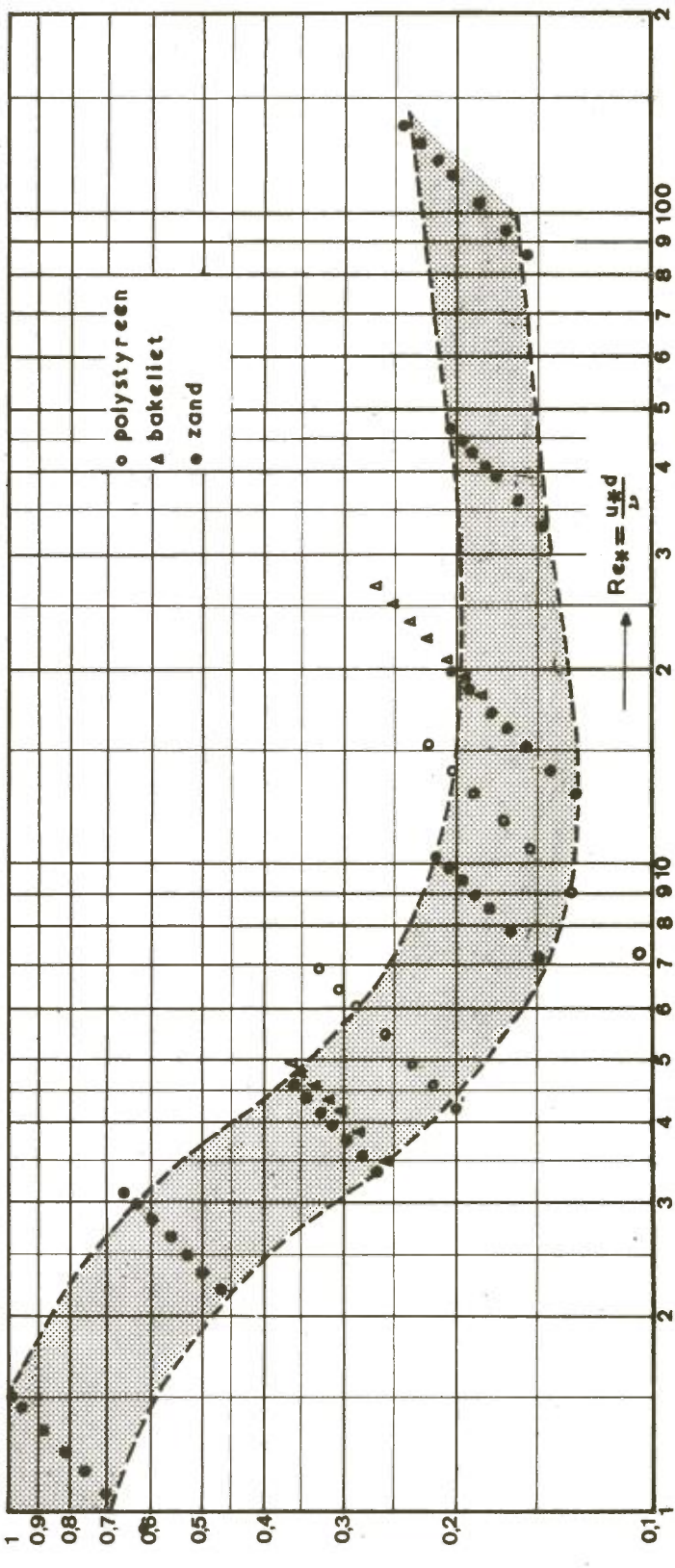
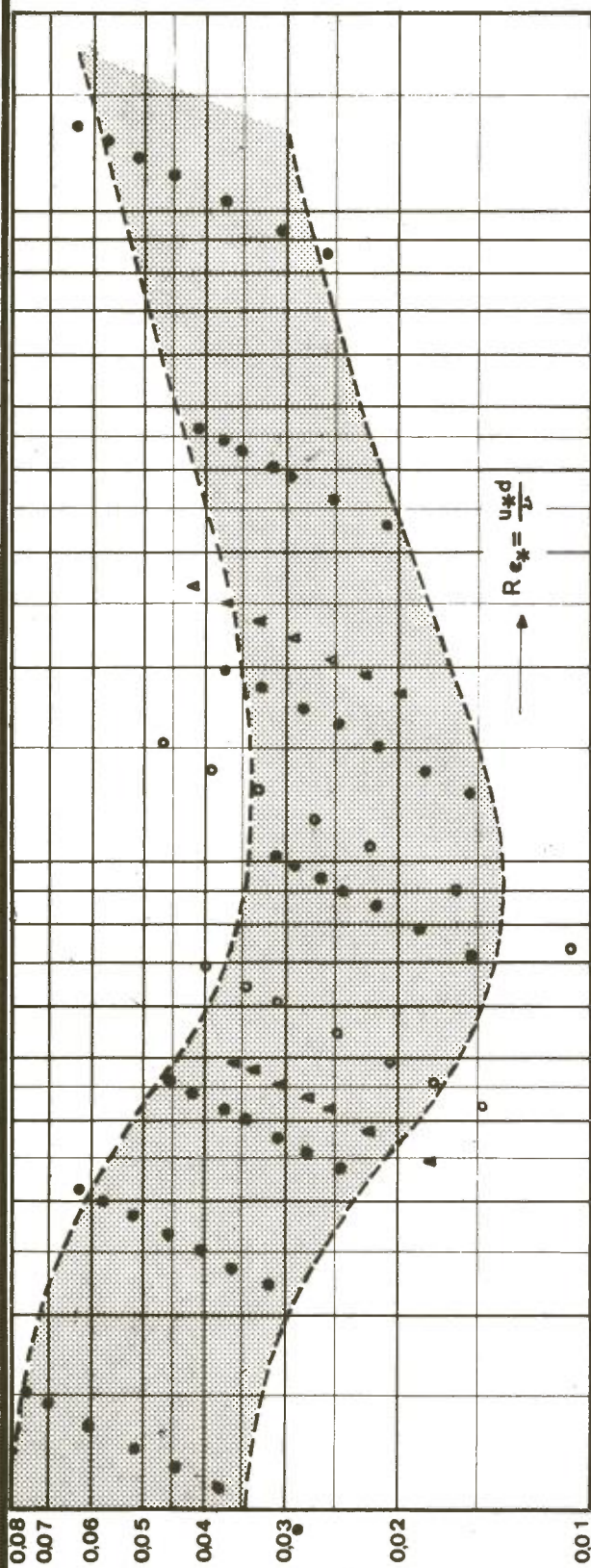
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.648/863 | BUL. I-22



VERTIKALE SNELHEIDSVERDELING BIJ BEGIN VAN BEWEGING





$$\psi_{kr} = \frac{u_{*kr}^2}{\Delta g d}$$

$$\frac{u_{*kr}}{w}$$

VERBAND TUSSEN  $\psi_{kr}$  EN  $Re_{*kr}$  EN TUSSEN  $u_{*kr}/w$  EN  $Re_{*kr}$

