

1106A

Zandstorten onder water

April 1987

Ir. F.T. Heezen



Havinga

Henri Haringa

ZANDSTORTEN ONDER WATER

met behulp van vertikaal pijpstorten

FT Heezen
TU Delft,
faculteit der Civiele Techniek
vakgroep waterbouwkunde
februari 1987

INHOUDSOPGAVE	blz
1. Samenvatting	2
2. Inleiding	
2.1 Achtergrond	3
2.2 Stortmethoden	3
2.3 Probleemstelling	4
3. Fysische processen	
3.1 Inleiding	5
3.2 Spuiten	
3.2.1 Woelkrater	5
3.2.2 Afstroming	7
3.3 Spuiten vertraagd	10
3.4 Dwarsstroom en verlies	10
4. Rekenmodel	13
5. Tholense gat: berekeningen en metingen	
5.1 Inleiding	14
5.2 Woelkrater	14
5.3 Talud	15
5.4 Afstroming	16
5.5 Verlies	17
6. Conclusies	
6.1 Verlies	19
6.2 Talud	19
7. Literatuuropgave	21

BIJLAGEN

1. 1 - dimensionale beschouwing	22
2. meetgegevens Tholense gat	25
3. Bodenvorm Tholense gat	27
4. Programmalisting	28
5. Berekeningsresultaten	36
5a. Spuiten, geen dwarsstroom	37
5b. Spuiten, dwarsstroom = 0,3 m/s	38
5c. Spuiten, dwarsstroom = 0,6 m/s	40
5d. Spuiten, dwarsstroom = 1 m/s	42
5e. Spuiten vertraagd, geen dwarsstroom	43
5f. Spuiten vertraagd, dwarsstroom = 0,6 m/s	44
5g. Spuiten, korte duur	45
5h. Spuiten, kortere tijdstappen	46
6. Nader onderzoek	48

1. SAMENVATTING

In het Oosterscheldebekken zijn t.b.v. het Deltaproject twee compartimenteringsdammen voorzien: de Oesterdam en de Philipsdam. Op economische gronden is bij deze dammen gekozen voor een sluiting d.m.v. zand spuiten. Dit gebeurt zowel horizontaal, door zand over de kop van dam te spuiten, als vertikaal, door zand onder water vertikaal vlak boven de bodem uit een persbuis te spuiten.

Dit onderzoek richt zich op het vertikaal onder water spuiten.

Problemen bij deze bouwmethode zijn het mogelijke optreden van zandverlies uit het stortmengsel en de onbekendheid met de taludhellingen die kunnen ontstaan.

Teneinde bovenstaande vragen te kunnen beantwoorden, moet de mengselstroming met zijn relaties tot bodem en dwarsstroom in het sluitgat beschreven worden. Er is hiertoe een methode ontwikkeld om de krater die ontstaat bij vertikaal spuiten te bepalen en er is een afstromingsmodel ontwikkeld dat het radiale stroombeeld berekent vanaf de kraterrand of - bij gebruik van een stroomremmende schotel onder de stortmond - vanaf de schotelrand.

Met het bovengenoemde model kan de bodemophoging in de loop van de tijd, de sedimentatie en erosie bij de bodem en de opwerveling vanuit de mengselstroom naar de dwarsstroom berekend worden. Uit de relatie tussen deze opwerveling en het evenwichtsconcentratieverloop van de dwarsstroom in het sluitgat is het totale verlies te bepalen.

De berekeningen zijn toegespitst op de situatie bij de sluiting van het Tholense Gat in de Oesterdam. Tevens zijn de uitkomsten van de berekeningen vergeleken met metingen, gedaan tijdens deze sluiting.

Uit de berekeningen blijkt dat verliezen kunnen ontstaan zowel door bovengenoemde opwerveling als door het optreden van sprongen, doordat het mengsel van een super- in een subkritische stroming overgaat. De maximale waarden van de verliezen kunnen oplopen tot zo'n 20% (van het spuitdebiet) voor het sprongverlies en 30% voor de opwerveling.

De metingen geven een veel lager verlies, in de orde van procenten. Een exacte verklaring is hier niet voor; waarschijnlijk is de stroming voorbij de kuil veel eerder afgelopen dan aangenomen en is de uitwisseling tussen mengsel en omgevingswater minder intensief, of gaat er in plaats van zand en water uit het mengsel naar de dwarsstroom, water uit de dwarsstroom naar het mengsel.

M.b.t. de opbouw van het talud blijkt dat er geen constante helling ontstaat, en is er geen grens aan de steilheid. De helling die ontstaat is afhankelijk van het verloop van het proces, en varieert over de afstand tot de stortmond. Na verloop van tijd kan zelfs plaatselijk de evenwichtshelling overschreden worden, waarna vloeïng optreedt en de helling weer flauwer wordt. Dit laatste proces is overigens niet onderzocht in het model.

2 INLEIDING

2.1 Achtergrond

Zandstorten onder water m.b.v. baggerwerktuigen is een in de waterbouw veel gebruikte bouwwijze. Een van de toepassingen is het opspuiten van dammen of dijken.

Zolang er weinig stroming staat treden er nauwelijks problemen op. Anders wordt het als er sluitgaten moeten worden gedicht. Door de veel kleinere opening kunnen de stroomsnelheden sterk toenemen. Dit heeft ook tot gevolg dat de verliezen, d.w.z. de hoeveelheid meegesleurd zand uit het spuitmengsel, groter zullen worden. Essentieel is nu dat de hoeveelheid zand die bezinkt groter is dan de hoeveelheid zand die uit het sluitgat wordt meegesleurd.

Een situatie waar dit speelt is de sluiting van de compartimenteringsdammen: de Oesterdam en de Philipsdam. Op economische gronden is hier gekozen voor een zandsluiting.

De vraag is nu of deze mogelijk is en zo ja, hoeveel zand er netto bezinkt. Dit laatste is van belang om de hoeveelheid zand, nodig voor de sluiting, en het benodigde produktievermogen te kunnen berekenen.

Mede naar aanleiding van het bovenstaande is dit onderzoek verricht. Het is een onderdeel van het MODVLO programma, waarin onderzoek wordt gedaan naar geconcentreerde zand/water stromingen boven en onder water.

Het doel van het onderzoek is in hoofdstuk 2.3, de probleemstelling, nader omschreven.

2.2 Stortmethoden

De belangrijkste stortmethoden zijn in de praktijk het hydraulisch persen (het spuiten van een zandwater mengsel uit een pijp) en het klappen uit een beunhopper (het zand wordt gestort door het openen van kleppen in de bodem van het schip). In dit onderzoek is het spuiten beschouwd, een bij de zandsluiting van het Tholense Gat gebruikte stortmethode. Het spuiten kan gebeuren door de pijp horizontaal op het al aanwezige damlichaam te leggen en het mengsel "over de kop" weg te spuiten of door de pijp vertikaal in het water te hangen met de mond vlak boven de bodem. In dit onderzoek is alleen het laatste geval beschouwd; het horizontaal spuiten is in vorige onderzoeken aan de orde geweest, o.a. van Mastbergen [2].

Aan de stortmond kunnen voorzieningen bevestigd worden om de straal te breken. De gedachte hierachter is dat het verlies minder kan worden en de taludhellingen steiler. Om dit te verifiëren zijn twee verschillende methoden doorgerekend: een mond zonder hulpstuk ("spuiten") en een mond, voorzien van een schotel die de straal volledig breekt ("spuiten vertraagd").

Elke uitvoeringstechniek heeft een aantal beginparameters, die het proces bepalen. Dit zijn de storthoogte, de concentratie van de mengselstroom, de diameter van de stortmond en het debiet.

2.3 Probleemstelling

In het algemeen zijn bij zandstorten onder water drie factoren van belang: lage verliezen (zie paragraaf 1.1), steile taludhellingen en een veilig zandlichaam. Dit laatste betekent dat er bij een bepaalde bereikbare zandkwaliteit een minimum taludhelling wordt vastgesteld.

In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar het verlies en de taludhelling. De probleemstelling valt uiteen in twee vragen:

- 1 - hoe werkt het verliesproces en is het verlies te verminderen,
- 2 - hoe ontstaan de taluds en kunnen deze steiler worden gemaakt.

Om deze vragen te kunnen beantwoorden moeten eerst een aantal deelproblemen worden opgelost: welke stortmethoden zijn mogelijk (zie paragraaf 2.2), hoe verloopt de mengselstroming en wat is de invloed van een eventuele dwarsstroom. Deze laatste vragen komt aan de orde in de hoofdstuk 3, waarbij uitgegaan wordt van de situatie bij de zandsluiting van het Tholense gat.

Het numerieke model komt kort aan de orde in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden berekeningen en metingen m.b.t. de sluiting gegeven. Besloten wordt met hoofdstuk 6, conclusies.

3. FYSISCH PROCESSEN

3.1 Inleiding

M.b.t. de mengselstroming zijn er twee gebieden te onderscheiden: de woelkrater en de afstroming. De woelkrater ontstaat doordat de straal zich in het zand boort en een wal om de straal heen opwerpt; de krater ontstaat alleen bij spuiten. De afstroming vindt plaats zowel bij spuiten als bij spuiten vertraagd. In het eerste geval is het de stroming vanaf de kraterrand, in het tweede geval de stroming vanaf de schotelrand: hier treedt namelijk geen krater op, omdat de straal door de schotel volledig horizontaal wordt afgebogen.

Behalve mengselstroming kan er ook een dwarsstroom optreden. Deze heeft invloed op het mengsel door wrijving, maar ook op de verliezen doordat de dwarsstroom een bovengrens aan de zandopwerveling stelt.

3.2 Spuiten

3.2.1 Woelkrater

De woelkrater bij spuiten ontstaat vrijwel meteen aan het begin van het proces, als de pompen worden aangezet. Er ontstaat een kuil met een wal er omheen; de volumes van uitgraving en ophoging zijn gelijk. De binnentaludhelling heeft, uitgaande van proefresultaten, een constante helling van ongeveer 30° .

De krater heeft de vorm van een afgeknotte kegel, met manteloppervlak A_k en inhoud V_k (zie fig 1):

$$A_k = \pi(R_t + R_b) \cdot \{(R_t - R_b)^2 + h^2\}^{1/2} \quad [m^2] \quad (3.1)$$

$$V_k = 1/3 \cdot h \cdot \pi(R_t^2 + R_t \cdot R_b + R_b^2) \quad [m^3] \quad (3.2)$$

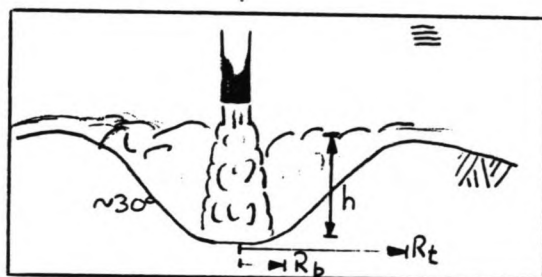


fig 1 Woelkrater

Met R_t = straal krater, R_b = straal bodem krater en h = hoogte krater.

Bij proeven is gebleken dat er een evenwichtsgrootte bestaat die tijdens het spuitproces nauwelijks verandert. Dit evenwicht wordt volgens Heezen/vd Stap [1] voornamelijk bepaald door de impuls van de straal aan de ene kant en het volume van de krater aan de andere kant. Uit een dimensiebeschouwing volgt dan voor de straal van de krater:

$$R_t = \{ \rho_m \cdot Q \cdot w / (\rho_w \cdot g \cdot HS) \}^{1/3} \quad [m] \quad (3.3)$$

Met Q = mengseldebiet, w = mengselsnelheid, HS = dimensieloze constante die volgens Heezen/van der Stap [1] $\approx 3 \cdot 10^{-2}$, ρ_m = mengsel dichtheid in de buis, ρ_w = dichtheid water.

R_b zal net zo breed zijn als de straal op de bodem van de krater; Volgens Fischer [6] geldt voor R_b , met gebruikmaking van de turbulente straaltheorie:

$$R_b = \text{straal buis} + 0,1h \quad [m] \quad (3.4)$$

De afmetingen van de krater zijn nu te bepalen als ρ_m , Q en w bekend zijn.

Uit het mengsel sedimenteert zand. Dit heeft tot gevolg dat de bodem ophoogt en de concentratie van het mengsel dat over de rand stroomt lager is dan dat van het spuitmengsel.

De ophogingssnelheid van de bodem en de mengsel dichtheid op de rand kunnen als volgt bepaald worden:

$$\text{ophogingssnelheid} = S_z(\text{sed}) / (\pi \cdot R_t^2) \cdot 1/c_b \quad [m/s] \quad (3.5)$$

$$S_z(\text{sed}) = w_s \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot c_m \quad [m^3/s] \quad (3.6)$$

Met c_b = concentratie zand in bodem $\approx 0,6$, $S_z(\text{sed})$ = volume zandkorrels dat in de kuil sedimenteert (nb: werkelijke zandvolume = $S_z \cdot 1/c_b$), c_m = gemiddelde concentratie in kuil, w_s = gereduceerde valsnelheid van een korrel (het "hindred settling" effect). Volgens Richardson en Zaki [5] geldt hiervoor:

$$w_s = w_0 (1 - c_m)^\alpha \quad [m/s] \quad (3.7)$$

$$w_0 = 10 \cdot \nu / D \cdot ((1 + \Delta g D^3) / (100 \nu^2) - 1)^{1/2} \quad [m/s] \quad (3.8)$$

Met w_0 = ongestoorde valsnelheid, met $\alpha \approx 4$, ν = viskositeit van het water, D = diameter korrel en $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ met ρ_s = dichtheid van de korrels. Daarnaast geldt:

$$\text{concentratie op rand} = c_{mr} = S_z(\text{uit}) / Q(\text{uit}) \quad [-] \quad (3.9)$$

$$S_z(\text{uit}) = c_{m0} \cdot Q - S_z(\text{sed}) \quad [m^3/s] \quad (3.10)$$

$$Q(\text{uit}) = Q - S_z(\text{sed}) \quad [m^3/s] \quad (3.11)$$

Met $S_z(\text{uit})$ = volume zandkorrels dat de kuil uitgaat, $Q(\text{uit})$ = mengseldebiet dat de kuil uitgaat, c_{m0} = concentratie in buis en c_{mr} = concentratie op rand.

Als nu de c_m bekend is kunnen de ophogingssnelheid en de concentratie op de rand bepaald worden. Door het proces een paar keer door te rekenen met telkens $c_m = 1/2 \cdot (c_{m0} + c_{mr})$ kan c_m redelijk nauwkeurig bepaald worden.

3.2.2 Afstroming

De afstroming vindt plaats radiaal en superkritisch vanaf de krater-rand. De buitentaludhelling van de wal is bovenaan steil. Hier wordt aangenomen dat dit de natuurlijke taludhelling 1:1,5 is. Onderaan is de helling flauwer, mogelijk doordat vloeiingen optreden. Als benadering wordt voor deze begintaludhelling een exponentieel verloop aangenomen, zodanig dat de maximum helling 1:1,5 is en de volumina van ophoging door de wal en uitdieping door de krater gelijk zijn. De beginvoorwaarden van de stroming zijn de mengselsnelheid, -hoogte en -concentratie op de rand. De rand kan gezien worden als een overlaat. De stroming is dan, volgens Kranenburg [9], intern kritisch:

$$\text{Froude}^2(\text{intern}) = u_m^2 / (\epsilon \cdot g \cdot h_m) = 1 \quad (3.12)$$

Er geldt dan:

$$u_{mr} = (\epsilon \cdot g \cdot Q / (2\pi \cdot R))^{1/3} \quad [\text{m/s}] \quad (3.13)$$

$$h_{mr} = Q / (u_{mr} \cdot 2\pi \cdot R_t) \quad [\text{m}] \quad (3.14)$$

$$c_{mr} = S_z / Q(\text{uit}) \quad [-] \quad (3.15)$$

Met $\epsilon = (\rho_m - \rho_w) / \rho_m$, u_{mr} = snelheid op de rand en h_{mr} = mengselhoogte op de rand.

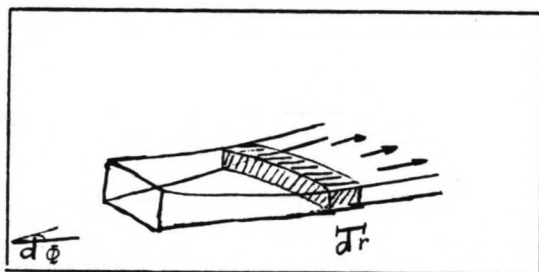


fig 2 Stromingsblokje

Voor een blokje uit de stroming kunnen nu balansen worden opgesteld voor massa van water en zand, voor impuls en voor de massa van het zand alleen (zie fig 2):

$$\text{massa} \quad d/dr(\rho_m \cdot h_m \cdot u_m \cdot r \cdot \phi) - \rho_b(E-S) \cdot \phi \cdot r + \rho_m \cdot 0_{pw} \cdot \phi \cdot r - \rho_w \cdot V \cdot \phi \cdot r = 0 \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{impuls} \quad & d/dr(\rho_m \cdot h_m \cdot u_m^2 \cdot r \cdot \phi) - \rho_m \cdot h_m \cdot g' \cdot \sin(i) \cdot r \cdot \phi + \\ & 1/2 \cos(i) \cdot g' \cdot d/dr(\rho_m \cdot h_m^2 \cdot r \cdot \phi) + (\tau_o + \tau_i) r \cdot \phi = 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{zand} \quad & d/dr((\rho_m - \rho_w) \cdot h_m \cdot u_m \cdot r \cdot \phi) - \\ & (\rho_b - \rho_w) \cdot (E-S) \cdot r \cdot \phi + (\rho_m - \rho_w) \cdot 0_{pw} \cdot r \cdot \phi = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Met ρ_b = bodemdichtheid, E = erosiesnelheid, S = sedimentatiesnelheid, ϕ = part van de cirkel, 0_{pw} = opwervelingssnelheid, V

= wateropname snelheid van de mengsellaag, r = afstand tot de stortmond, i = taludhelling (positief gedefinieerd als de stroming naar beneden gaat), τ_0 = bodemwrijving, τ_i = grensvlakwrijving; beide wrijvingen positief gedefinieerd tegen de stroming in. g' is de zg. zwaartekracht onder water:

$$g' = g \cdot \epsilon \quad [\text{m/s}^2] \quad (3.19)$$

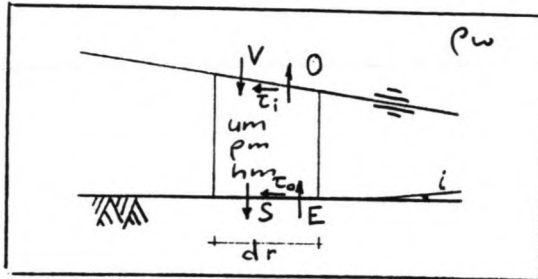


fig 3 Processen

Rond en in het blokje treden een aantal processen op, die de stromingsgrootheden beïnvloeden (zie fig 3): de sedimentatie S , de erosie E , de opwerveling Opw , de wateropname V en de wrijving.

De sedimentatie geeft de ophogingssnelheid van de bodem (zie Mastbergen [2]):

$$S = w_s \cdot c_m / c_b \quad [\text{m/s}] \quad (3.20)$$

De erosiesnelheid is de snelheid waarmee de bodem erodeert. De hier gebruikte redenering volgt Mastbergen [2]. Er bestaat voor elke stroming met een bepaalde c_m , h_m en u_m een evenwichtssituatie waarbij $S = E$. S is te bepalen doordat c_m bekend is, waaruit meteen E volgt. Voor de stroomsnelheid en helling geldt nu:

$$u_m(\text{evenw}) = (q \cdot c_m \cdot D / 0,05)^{0,2} \cdot (\Delta g)^{0,4} \cdot (8 / (f_0 + f_i))^{0,3} \quad [\text{m/s}] \quad (3.21)$$

$$i(\text{evenw}) = ((f_0 + f_i) / 8)^{0,1} \cdot (\Delta^2 \cdot c_m \cdot D / 0,05)^{0,6} \cdot g^{0,2} / (\epsilon \cdot q^{0,4}) \quad (3.22)$$

Met q = specifiek debiet = $Q / (2\pi R)$, f_0 = wrijvingscoëfficiënt met bodem volgens Darcy-Weisbach:

$$f_0 = 8g / C^2 \quad (3.23)$$

f_i = wrijvingscoëfficiënt met het grensvlak en C = Chezy-coëfficiënt.

Exacte metingen van de f_0 en de f_i zijn niet beschikbaar. Uit een studie van Winterwerp e.a. [5] blijkt dat $f_i \approx 1/3 f_0$.

De f_0 wordt gesteld op 0,1, uitgaande van gegevens van Mastbergen [2].

Aangenomen wordt nu dat de erosie afhankelijk is van de turbulentie intensiteit ω , waarvoor geldt:

$$\omega = \rho_m \cdot u_*^2 \cdot u_m^2 / q \quad [\text{kg} \cdot \text{m/s}^3] \quad (3.24)$$

Met u_* = schuifspanningssnelheid:

$$u_* = u_m \cdot (f_0/8)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (3.25)$$

Het bovenstaande gecombineerd geeft:

$$\omega = \rho_m \cdot u_m^4 \cdot (f_0 + f_i) / (8 \cdot q) \quad [\text{kg} \cdot \text{m/s}^3] \quad (3.26)$$

In de evenwichtssituatie geldt $\omega = \omega_{\text{kritisch}}$ en $E = S$, in de niet-evenwichtssituatie geldt:

$$E = S \cdot \omega / \omega_{\text{kr}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.27)$$

De opwerveling vindt plaats volgens een convectie-diffusie proces (zie Mastbergen [2]). Met dwarsstroom geldt voor de opwerveling:

$$\text{Opw} = 1/8 f_i \cdot c_m \{ (u_m + u_{\text{dwars}} \cdot \cos \varphi)^2 + (u_{\text{dwars}} \cdot \sin \varphi)^2 \}^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (3.28)$$

Met φ = hoek tussen dwarsstroom en mengselstroom in radialen (zie fig 4) en u_{dwars} = snelheid van de dwarsstroom in m/s.

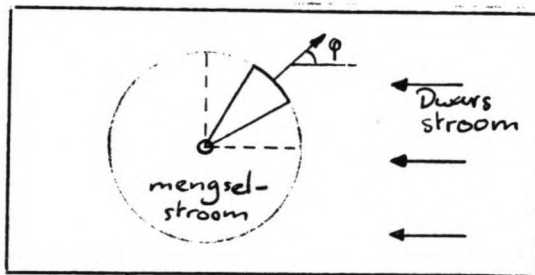


fig 4 Boven aanzicht mengselstroom

Uit de bovenstaande formule blijkt dat de opwerveling lineair afhankelijk is van de f_i , en dus van de f_0 . In de literatuur variëren de opgegeven waarden sterk. Een Chezy waarde van 40 geeft bijvoorbeeld $f_0 = 0,05$ (factor 2 kleiner); een in het dictaat b81, dichtheidsstromen, (Kranenburg) genoemde waarde voor f_i is 0,012 (factor 3 kleiner).

De hier berekende opwervelingssnelheid is een potentiële opwerveling: zodra de dwarsstroom zoveel zand heeft opgenomen dat de uitzakking hieruit even groot is als de opwerveling, is het netto transport nul (zie hoofdstuk 3.4).

De wateropname V door de mengselstroom uit de dwarsstroom is waarschijnlijk gering. Praktijkmetingen zijn voor deze grote dichtheidsverschillen niet gedaan. Uit studies van turbidity currents lijkt het dat de wateropname verwaarloosbaar is. De grotere verschillen in dichtheid bij de zand/water stromen verminderen de wateropname nog eens, zodat aangenomen wordt $V = 0$. Overigens heeft deze verdunning een grote invloed op het stromingsbeeld: door een eventuele wateropname wordt de stroomsnelheid minder, de concentratie lager, de mengselhoogte groter en neemt het debiet toe. Nader onderzoek is dus gewenst (zie bijlage 6).

Voor de bodemwrijving geldt bij een turbulente stroming (lit [5]):

$$\tau_0 = 1/8 \rho_m f_0 u_m^2 \quad [N/m^2] \quad (3.29)$$

Analoog aan de bodemwrijving kan een grensvlakwrijving worden gedefinieerd:

$$\tau_i = 1/8 \rho_m f_i (u_m + u_{dwars} \cos \phi) |u_m + u_{dwars} \cos \phi| \quad [N/m^2] \quad (3.30)$$

De grootte van de wrijving hangt dus lineair af van f_0 en f_i .

Door nu de stroming door te rekenen met bovenstaande formules kan de bodemophoging bepaald worden. Deze is namelijk afhankelijk van de sedimentatie en erosie op een bepaalde plaats.

De taludvormen volgen uit de verschillen in bodemophoging.

3.3 Sputten vertraagd

Een woelkrater treedt bij sputten vertraagd niet op. De afstroming begint direkt na de schotel over een -bij aanvang van het proces- vlakke bodem. De beginvoorwaarden van het afstromingsproces zijn de u_m , h_m en c_m op de rand van de schotel. De schotelstroming is een zg "vlakke plaat" stroming (lit [8]). Met een impulsbeschouwing volgt dan voor u_m , h_m en c_m op de rand:

$$u_{mr} = u_m \text{ in stortbuis} \quad [m/s] \quad (3.31)$$

$$h_{mr} = Q/(2\pi R_s) \quad [m] \quad (3.32)$$

$$c_{mr} = c_m \text{ in buis} \quad [-] \quad (3.33)$$

Met R_s = straal van de schotel.

Het afstromingsproces verloopt verder analoog aan sputten.

3.4 Dwarsstroom en verlies

De dwarsstroom heeft invloed op de stromingsgrootheden en op het verlies uit de mengselstroom. De invloed op de stroming is in hoofdstuk 3.2 behandeld, de invloed op het verlies wordt hier gegeven.

Bij de bepaling van het verlies spelen twee zaken een rol: hoeveel kan er uit de mengselstroming komen en hoeveel kan de dwarsstroom opnemen. Uit het mengsel kan het zand komen door opwerveling of door een subkritische sprong; deze sprong vergroot de mengselhoogte sterk, waardoor de dwarsstroom zeer veel invloed kan krijgen en het mengsel op zal nemen. Er wordt nu aangenomen dat als de dwarsstroom het volledige sprongverlies kan opnemen, dit ook inderdaad gebeurt. M.b.t. de opwerveling heeft de dwarsstroom invloed doordat het snelheidsverschil tussen de lagen beïnvloed wordt. Tegen de stroom in wordt daardoor de potentiële opwerveling groter en met de stroom mee kleiner.

Aan de andere kant is er een maximale opnamecapaciteit van de dwarsstroom. Als de capaciteit kleiner is dan de potentiële opwerveling en het verlies door sprongen, dan wordt het verlies bepaald door deze capaciteit. Omgekeerd geldt natuurlijk dat als de potentiële opwerveling en het verlies door sprongen kleiner zijn dan de capaciteit, het totale verlies bepaald wordt door dit potentiële verlies.

Het mengselstromingsverlies volgt uit de berekeningen van hoofdstuk 3.2 en 3.3. De opnamecapaciteit van de dwarsstroom kan als volgt worden berekend.

De totale sedimentload C_{ong} vóór de mengselstroom (zie fig 5) is te bepalen met Englund-Hansen (lit [2] en [3]):

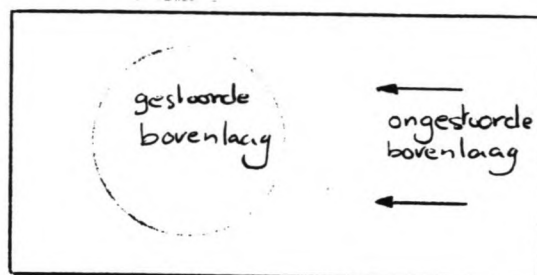


fig 5 Sluitgatstroming

$$C_{ong} = 0,05(f_0/8)^{1,5} \cdot u_{dwars}^4 / ((\Delta \cdot g)^2 \cdot d_{50}) \quad [m^3 \text{ zandkorrels}/m^2] \quad [m] \quad (3.34)$$

Het evenwichtsconcentratieprofiel in de dwarsstroom kan met Rouse worden bepaald (zie Fischer [6]):

$$c(z) = c(a) \cdot (a/(h-a)) \cdot (h-z)/z)^Z \quad [-] \quad (3.35)$$

Met $c(a)$ = concentratie op referentiehoogte a , z = afstand tot bodem, $a = 0,05h$, h = waterdiepte en Z = suspensiegetal:

$$Z = w_s / (\kappa \cdot u_*) \quad [-] \quad (3.36)$$

Met κ = constante van Karman = 0,4 en u_* = schuifspannings-snelheid:

$$\text{vóór de mengselstroom: } u_* = u_{dwars} \cdot (f_0/8)^{1/2} \quad [m/s] \quad (3.37)$$

$$\text{boven de mengselstroom: } u_* = u_{dwars} \cdot (f_i/8)^{1/2} \quad [m/s] \quad (3.38)$$

$w_s \approx w_0$ vanwege de lage concentratie in de dwarsstroom. Vóór de mengselstroom geldt m.b.t. de sedimentload c :

$$\int c(z) dz = c \quad [m] \quad (3.39)$$

De sedimentload boven de stroom kan berekend worden door $c(z)$ te integreren, als de concentratie $c(h)$ aan de bovenkant van de mengselstroom bekend is. Deze $c(h)$ is dan de $c(a)$ van form. 32. Voor deze concentratie geldt volgens Mastbergen:

$$c(h) = c_m / (1 + \kappa Z \cdot (8/f_i)^{1/2}) \quad [-] \quad (3.40)$$

De Z heeft boven de mengselstroming een andere waarde dan ervoor,
aangezien de u_* verandert (form)

De totale opnamecapaciteit van de dwarsstroom wordt dan:

$$u_{dwars} \cdot \left\{ \int c(z) dz - c_{ong} \right\} \cdot \text{breedte mengselstroming} \quad [m^3/s] \quad (3.41)$$

Om de berekening uitvoerbaar te houden, is aangenomen dat de c_m constant is. Deze aanname klopt wel voor smallere stromingen die eindigen in een mengselsprong (tot 20 m breed), maar niet voor bredere stromingen (20 tot 40 m breed). In dat geval worden de c_m en de Z in form 34 overschat; een te grote c_m leidt tot een te grote $c(h)$, een te grote Z leidt tot een te kleine $c(h)$: de effecten zijn dus tegengesteld. De invloed van c_m is groter, dus netto zal de totale opnamecapaciteit overschat worden (zo'n 5 tot 25%).

4. REKENMODEL

De berekening van de afstroming vindt plaats door voor elk blokje in een raai de c_m , h_m en u_m en de bijbehorende processen uit te rekenen. Dit gebeurt door stap voor stap het stelsel balansvergelijkingen m.b.v. matrixrekening op te lossen en tegelijk de op het blokje inwerkende processen sedimentatie, erosie, verdunning en opwerveling te bepalen. De toegepaste numerieke methode is een voortgaande differentie in de afstand m.b.v. de predictor-corrector methode (de Vries).

Het verloop in de tijd wordt berekend door na elkaar dezelfde raaien door te rekenen, telkens rekening houdend met de in de voorgaande tijdstap berekende bodemhoogtes (zie fig 6 rechts).

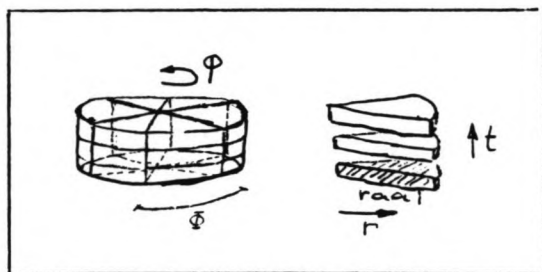


fig 6 Berekeningswijze

De van de hoek afhankelijke invloed van de dwarsstroom wordt meegenomen door deze processen te herhalen voor verschillende hoeken t.o.v. de dwarsstroom (zie fig 6 links).

De mengselstroming wordt geacht te zijn bezonken als de laagdikte kleiner wordt dan 1 cm . Als $(\rho_m - \rho_w) < 1$ wordt aangenomen dat de dichtheidsstroom is verdwenen.

De verliesberekening gebeurt als volgt:

van elke raai wordt voor elke tijdstap en hoek het sprongverlies en de potentiële opwerveling bepaald. Van de raaien loodrecht op de dwarsstroom wordt tevens voor elke tijdstap de breedte van de mengselstroming bepaald. Daarna wordt voor elke tijdstap de opnamecapaciteit van de dwarsstroom berekend.

Hieruit volgt het verlies uit het proces, afhankelijk van de capaciteit van de dwarsstroom en de potentiële opwerveling en sprongen (zie H 3.4). Alle verliezen van de tijdstappen gesommeerd geven dan het totale verlies over een berekeningsperiode.

5. THOLENSE GAT: BEREKENINGEN EN METINGEN

5.1 Inleiding

Bij de Tholense gat sluiting is vertikaal onder water gespoten zonder schotel. Met twee zuigers is een drempel gebouwd van enkele honderden meters breedte. Tijdens het spuiten lag de kop gedurende 10-15 min op een vaste plaats, waarna hij verhaald werd naar een naastliggende Voor de berekening worden de gegevens van 9 oktober 1986 gebruikt omdat van die datum meetgegevens beschikbaar zijn. Voor de twee zuigers gelden de volgende parameters:

	zuiger 1	zuiger 2	
zandproduktie	6500	5000	m ³ /h
diameter buis	0,9	1,0	m
concentratie zand (vol)*	0,35	0,35	
d50	185	185	μ m
debiet (volume)	6	4,6	m ³ /s
concentratie korrels (vol)	0,21	0,21	
dichtheid mengsel	1347	1347	kg/m ³
snelheid in buis	9,4	5,9	m/s

* inclusief poriën

De dwarsstroom varieerde van 0 tot 0,6 m/s; de waterdiepte was 12 m. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de berekeningen gepresenteerd en met de - voor zover beschikbaar - metingen van het Tholense gat m.b.t. bodem- en stromingseigenschappen. Eerst komt de bodem (woelkrater en talud) aan de orde, daarna de stroming (afstroming en verlies).

5.2 Woelkrater

Berekeningen m.b.t. de kraters van de twee zuigers levert het volgende:

	zuiger 1	zuiger 2	
Straal R_t	7,2	5,8	m
concentratie c_{mr}	0,17	0,18	
bodemophogingssnelheid	2,8	2,7	mm/s

In de gemeten bodemprofielen kunnen de restanten van een aantal woelkraters herkend worden (zie bijlage 3): de wallen zijn achtergebleven. Niet precies is uit de metingen te bepalen welke vorm de kuil had en op welke plaats t.o.v. de kuil gepeild is (zie fig 7). Een schatting is wel te maken van de diameter, residudiepte en de binnentaludhelling doordat een aantal raaien vlak naast elkaar zijn gemeten, en sommige kuilen op meerdere meetraaien voorkomen.

Uit de meetgegevens is nu het volgende bepaald:

	<u>variatie</u>	<u>gemiddeld</u>
Straal R_t	5 - 12,5	8,4
residudiepte	0,8 - 1,6	1,2
binnenhelling	1:1 - 1:4	1:2,6

De waarden gelden voor een "bezonken" kuil, dus een kuil die achterblijft na het spuitproces. Tijdens het spuiten zal de binnenhelling steiler kunnen zijn en de diepte groter.

Een schatting voor deze waarden tijdens het spuiten is respectievelijk 1:2 en 2,5 m.

Vergelijking van de gemeten met de berekende stralen geeft aan dat de berekening lage resultaten geeft, maar qua orde van grootte goed is.

Met de nu bekende straalwaarden uit de praktijkmetingen is opnieuw gekeken naar de bepalende factoren voor de kratergrootte. Voor wat betreft uitdiepende factoren is beschouwd de kinetische energie, de impuls, de massaastroom en het debiet. Voor wat betreft de ophogende factoren is gekeken naar de mengseldichtheid in de kuil, volume van het sedimenterende zand in de kuil en de inhoud en oppervlakte van de kuil.

Uit deze mogelijkheden kwam weer naar voren dat de verhouding impuls versus gewicht van het mengsel in de krater de meest constante waarde gaf; de HS - parameter, zoals beschreven in hoofdstuk 3.2 blijft dus vooralsnog de beste benadering.

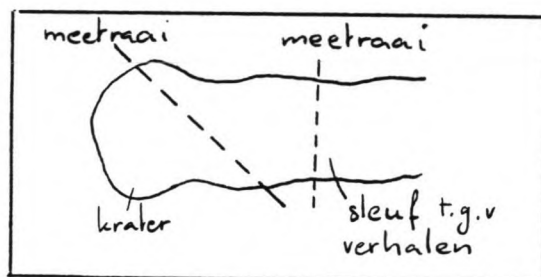


fig 7 Meetraaien

5.3 Talud

Uit de berekeningen blijkt dat de bodem zich als een schol ophoogt (zie bijlage 5a en 5b); bij de rand gaat het wat langzamer dan verder weg. Dit is het gevolg van de hoge stroomsnelheid bij de rand, waardoor de erosie groot is; de sedimentatie is vrijwel gelijk.

Op 20 m van de buis ontstaat een talud, waarvan de helling in de loop van de tijd steeds steiler wordt. Bij tegenstroom ontstaat een sprong, meestal aan de stroomopwaartse zijde, maar soms ook aan stroomafwaartse zijde, waardoor een gedeelte van het zand in de bovenstroom terecht komt en een gedeelte bezinkt. De ophoging die hierdoor ontstaat zal de sprong nog versterken.

Er ontstaat dus geen gelijkmatige opbouw van een talud onder een

evenwichtshelling, maar een afwisselend beeld van kuilen, bulten en vlakke stukken, allemaal in de omgeving van de krater.

5.4 Afstroming

Ter illustratie zijn de volgende gevallen doorgerekend:

1. zuiger 1, geen dwarsstroom (bijlage 5a)
2. zuiger 1, dwarsstroom = 0,3 m/s (bijlage 5b)
3. zuiger 1, dwarsstroom = 0,6 m/s (bijlage 5c)
4. zuiger 1, dwarsstroom = 1 m/s (bijlage 5d).

Bij geval 1 gebeurt het volgende. De mengselconcentratie neemt af, doordat de korrels uitzakken en het water achterblijft in de stroming. De snelheid neemt aanvankelijk toe, doordat het mengsel van een helling stroomt; daarna neemt hij weer af, doordat de stroming horizontaal loopt en de wrijving een grotere rol kan spelen. De mengselhoogte past zich aan het specifieke debiet en de snelheid aan. Doordat de omtrek van de stroming steeds groter wordt neemt het debiet per eenheid van omtrek af. Zou de snelheid gelijk blijven dan betekent dit dat de hoogte geringer wordt. De twee effecten gesuperponeerd leveren een beeld als bijlage 5a op.

Bekijken we het verloop in de tijd, dan blijkt dat op $t = 300$ sec de stroming al na 4 m van de krater rand verdwijnt, in plaats van na 15 m zoals eerder in het proces. Dit betekent dat er een sprong optreedt en de stroming subkritisch wordt; dit is het gevolg van het feit dat door het uitzakken van de zandkorrels de bodem ophoogt en de stroming tegen een helling gaat oplopen, zodat het mengsel geremd wordt.

De invloed van de dwarsstroom blijkt uit bijlage 5a, 5b, 5c en 5d. De stroming is nu niet meer radiaal symmetrisch. Tegen de dwarsstroom in ($\varphi = 0$) wordt het mengsel sterk geremd, zodat er al snel een sprong optreedt.

Dwarsstroming opzij ($\varphi = 1,57$) geeft een beeld dat lijkt op dat in bijlage 5a; het effect van de dwarsstroom is gering doordat er geen component in de richting van de stroming staat.

Als de dwarsstroom en het mengsel in dezelfde richting stromen zijn er ook weinig verschillen te zien; de stroming loopt alleen wat verder door.

Opvallend bij al deze berekeningen zijn de beperkte omvang van de stroming (op meer dan 25 m van de buis is niets meer te zien), de geringe mengselhoogte (ongeveer 10 cm) en de sprong bij tegenstroom.

Indien het model juist is, geeft dit meteen aan waarom er geen metingen van het afstromingsproces zijn: de metingen begonnen pas op 25 m afstand van de stortmond, waar geen mengselstroming meer optreedt, en de instrumenten zijn nauwelijks in staat om op een hoogte van 10 cm of minder te meten.

5.5 Verlies

Voor de vier gevallen, genoemd in hoofdstuk 5.4 zijn eveneens de totale verliezen berekend voor een bouwtijd van 300 sec (zie bijlage 5a, 5b, 5c en 5d).

De verliezen van het mengsel en de opnamecapaciteit van de stroming worden berekend als beschreven in hoofdstuk 3.4 en daarna omgezet in een percentage van de zandproduktie. Om vergelijking met de metingen mogelijk te maken is er ook een regel opgenomen in de tabel die de gemiddelde concentratie over de diepte bij het "totaal verlies" geeft. De andere waarden zijn gegeven in percentages van de produktie.

geval	1	2	3	4
dwaarsstroom [m/s]	0	0,3	0,6	1
pot. sprongverlies [vol %]	13	11	20	26
pot. opwerveling [vol %]	28	29	29	32
capaciteit mengsel [vol %]	0	7	41	197
totaal verlies [vol %]	0	7	37	52
gem. concentratie [vol %]	,0	0,044	0,12	0,1

In geval 1 is er geen verlies, doordat de capaciteit van de bovenlaag nul is; in geval 2 bepaalt de capaciteit van de bovenlaag het verlies, waartoe zowel opwerveling als sprongen bijdragen; in geval 3 bepalen zowel de mengselstroom als de bovenlaag het verlies: soms is de capaciteit van de bovenlaag groter dan het potentiële verlies, soms kleiner; in geval 4 bepaalt het potentiële verlies van de mengselstroming het totale verlies.

Uit de verliesresultaten van geval 3 en 4 blijkt dat het sprongverlies een grote rol kan spelen. Nu treedt dit vooral op latere tijdstippen op, als er ophogingen zijn ontstaan. Door relatief kort op één plaats te spuiten zal dus dit sprongverlies beperkt kunnen worden (zie ter vergelijking bijlage 5b en 5g; de bouwtijd is in bijlage 5g 1/6 van de bouwtijd in 5b, terwijl het sprongverlies van 5g veel minder is dan 1/6. Zie ook bijlage 5h, waar een nauwkeuriger berekening in de tijd wordt gegeven).

Als de dwarsstroom voorbij het mengsel is, zal het zand weer uitzakken tot de evenwichtssituatie bereikt is. Een bovengrens voor de grootste afstand waarover de uitzakkende zandkorrels verplaatst kunnen worden geeft de volgende berekening.

De zandkorrels hebben (waterdiepte/ w_s) seconden nodig om te vallen. De dwarsstroom is intussen (udwars*waterdiepte/ w_s) verder gestroomd, zodat dit de maximale verplaatsing is.

In geval 2: $0,3.12/0,02 = 180$ m. In werkelijkheid zal het meeste zand eerder bezonken zijn, doordat de concentratie onder in de laag, en dus dichter bij de bodem, hoger is dan boven in de laag.

Bij de sluiting van het Tholense gat zijn een aantal metingen gedaan om het verlies te bepalen. Rechtstreekse metingen waren niet mogelijk, maar wel zijn concentratieprofielen boven- en benedenstrooms van de spuitkop bepaald (zie fig 8).

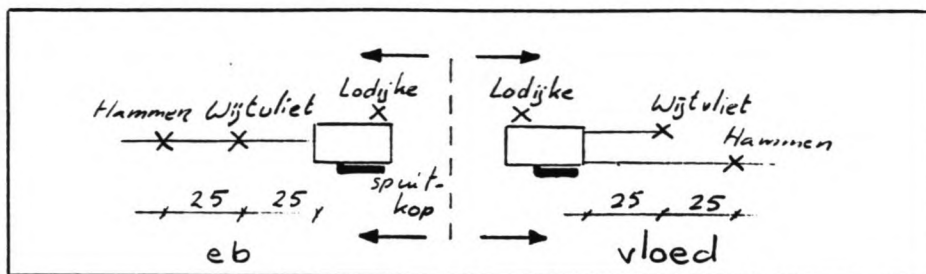


fig 8 Meetopstelling

Er zijn vier meetseries beschikbaar: 9 en 14 oktober 1986, zowel bij eb als bij vloedstroom (zie bijlage 2). Het gebruikte meetinstrument was een zg. AZTM, een akoustische concentratiemeter voor lage concentraties. De resultaten zijn opgenomen in de bijlagen; hierbij staan tevens vermeld de stroomsnelheden op dezelfde tijdstippen. De verwachting is dat stroomopwaarts van van de spuitmond de concentratie het minst is (meetvaartuig: lodijke), dat de mengselstroming direct na de mond het hoogst is (meetvaartuig: wijtvliet) en daarna weer afneemt (meetvaartuig: hammen).

De beide ebmetingen blijken geen betrouwbaar beeld te geven: soms is de concentratie stroomopwaarts hoger, soms lager. Een mogelijke verklaring is, dat de mengselstroming nog voorbij het stroomopwaartse meetinstrument doorliep.

De beide vloedmetingen geven wel een eenduidig beeld: bovenstrooms voortdurend een zeer lage concentratie, benedenstrooms een wisselende, maar duidelijk hogere zandconcentratie. Deze gemeten concentratie is echter veel kleiner dan de berekende: bv. gemeten 0,003 % en berekend 0,12 %, op 14 oktober bij 0,6 m/s dwarsstroom. De gemeten verliespercentages bedragen dan ongeveer 1 % van de zandproductie. Het blijkt dus dat de berekening veel te hoge verliezen geeft.

Aangetekend moet hierbij worden dat uit latere metingen (Krammer sluiting) is gebleken dat het meetinstrument, de AZTM, gevoelig voor luchtbelletjes en veen is. De gemeten concentratie is dan veel hoger dan de werkelijke. Het is mogelijk dat dit verschijnsel bij de Tholense Gat metingen opgetreden is. De werkelijke concentraties zijn dan nog lager, zodat de bovenvermelde conclusie versterkt wordt.

6 CONCLUSIES

6.1 Verlies

Het verlies bestaat uit sprongverlies en potentiële opwerveling. Tot ongeveer 0,5 m/s dwarsstroom is het totale verlies afhankelijk van de opname capaciteit van de bovenstroom, die weer afhankelijk is van de dwarsstroom snelheid. Boven de 0,5 m/s bepaalt de mengselstroom het verlies; de opwerveling bedraagt dan ongeveer 30 % en het sprongverlies ongeveer 20 %.

Het optreden van sprongen is sterk afhankelijk van de bodemvorm; als er relatief kort gespoten wordt (1-3 min) is de bodem nog zo vlak dat er geen sprong, en dus geen sprongverlies optreedt.

Verschillen tussen spuiten en spuiten vertraagd zijn gering: beide gevallen geven een verlies als hierboven genoemd (zie ter vergelijking bijlagen 5a + 5e en 5c + 5f).

De metingen van de sluiting van het Tholense gat geven aan dat het in werkelijkheid optredende verlies zeer gering is: rond de 1 %.

Oorzaken van het verschil tussen berekening en meting kunnen zijn:

- niet optreden van sprongen door bewegen van de spuitkop
- een gedeelte van het zand is weer uitgezakt voor het meetinstrument bereikt is
- de gekozen interne wrijvingscoëfficiënt f_i is te hoog.

Het optredende verlies lijkt, gezien de metingen, dus zeer gering te zijn. Toch is het aan te raden om de spuitkop niet al te lang (orde van grootte: enkele minuten) op dezelfde plaats te houden. Hierdoor wordt voorkomen dat sprongen optreden, die het verlies kunnen vergroten. Daarnaast heeft het ook voordelen voor de taludhelling (zie paragraaf 6.2).

De vereiste verplaatsing van de spuitmond hoeft niet groot te zijn (orde van grootte: 10 m).

6.2 Talud

Bij vertikaal spuiten onder water ontstaat geen geleidelijke opbouw van het talud door een (evenwichts) dispersiestroom. Het feitelijke stromingsbeeld is sterk afhankelijk van aannamen in de theorie over wrijving, verdunning, opwerveling, sedimentatie en erosie.

Na enige tijd spuiten ontstaan kuilen met mengselsprongen. Uit het opbouwproces (volgens het hier ontwikkelde model) volgt dat taludhellingen steiler dan het natuurlijk talud kunnen optreden. In de praktijk zal dan al een vloeïing zijn opgetreden, zodat de werkelijke helling hierdoor veel flauwer kan worden dan de berekening aangeeft.

Het is dan ook aan te raden de spuitkop tijdens het proces te bewegen en niet te lang op één plaats te spuiten, om eventuele zettingsvloeïingen beperkt te houden. De taludopbouw kan op zo'n manier redelijk in de hand gehouden worden.

Een van de voornaamste factoren die een steile helling veroorzaken is het voorkomen van een mengselsprong. Uit bijlage 5h blijkt dat deze - bij de hier gebruikte randvoorwaarden - ontstaat na 250 sec. Het is dus in dit geval aan te raden de kop ten minste elke vier minuten te verplaatsen.

LITERATUUROPGAVE

- [1] Heezen en van der Stap
"Onderwater gestorte zandlichamen"
TH Delft, februari 1985
- [2] Mastbergen en Leeuwestein
"Gedrag zandwater mengselstroming bij zandsluitingen"
TH Delft, mei 1986
- [3] Delver en Verwoert
"Onderzoek naar zandwater mengselstromen bij zandsluitingen"
TH Delft, juni 1986
- [4] Silvis e.a.
"Zandsluiting Slaak, meetverslag onderwater stort"
LGM, december 1986
- [5] Winterwerp en Besselink
"Zand-water mengselstromingen, verslag literatuurstudie"
WL, juli 1986
- [6] Fischer e.a.
"Mixing in inland and coastal waters"
Academic press New York, 1979
- [7] Davis
"Evaluatienota grondverbeteringen"
RWS, 1982
- [8] de Vries
"Vloeistofmechanica, dictaat b71 en b72"
TH Delft, 1980
- [9] Schönfeld en Kranenburg
"Dichtheidsstromen en interne golven, dictaat b81"
TH Delft, 1981

BIJLAGE 1: EEN DIMENSIONALE BESCHOUWING

De gebruikte theorie is ook bruikbaar om een 1-dim afstroming te berekenen, zoals kan optreden bij klappen. De belangrijkste verschillen met een radiaal stromingsbeeld zijn:

- specifiek debiet verandert veel minder sterk, zodat de mengselhoogte en -snelheid ook constanter zijn
- de bodemopbouw vindt veel geleidelijker, met minder steile hellingen plaats.

Uit de balansvergelijkingen (formules 14, 15 en 16) verdwijnen dan de termen met ψ :

$$\text{massa} \quad d/dr(\rho_m \cdot h_m \cdot u_m) - \rho_b(E-S) + \rho_m \cdot 0p_w - \rho_w \cdot V = 0 \quad (b1.1)$$

$$\begin{aligned} \text{impuls} \quad d/dr(\rho_m \cdot h_m \cdot u_m^2) - \rho_m \cdot h_m \cdot g' \cdot \sin(i) + \\ 1/2 \cos(i) \cdot g' \cdot d/dr(\rho_m \cdot h_m^2) + \tau_o + \tau_i = 0 \end{aligned} \quad (b1.2)$$

$$\text{zandmassa} \quad d/dr((\rho_m - \rho_w) \cdot h_m \cdot u_m) - (\rho_b - \rho_w) \cdot (E-S) + (\rho_m - \rho_w) \cdot 0p_w = 0 \quad (b1.3)$$

Ter vergelijking met de radiale afstroming zijn twee gevallen doorge-rekend:

1. Dezelfde beginvoorwaarden als aan de rand van de schotel (zie bijlagen 5e en fig 9)

```

waterdiepte= 12.00 m
d50= 185 mu

beginsnelh= 2.358 m/s   beginhoogte= 0.405 m   beginconc= 0.210
dx= 0.02 m           dt= 50.0 sec

raailengte= 20 m       bouwtijd= 300 sec
    
```

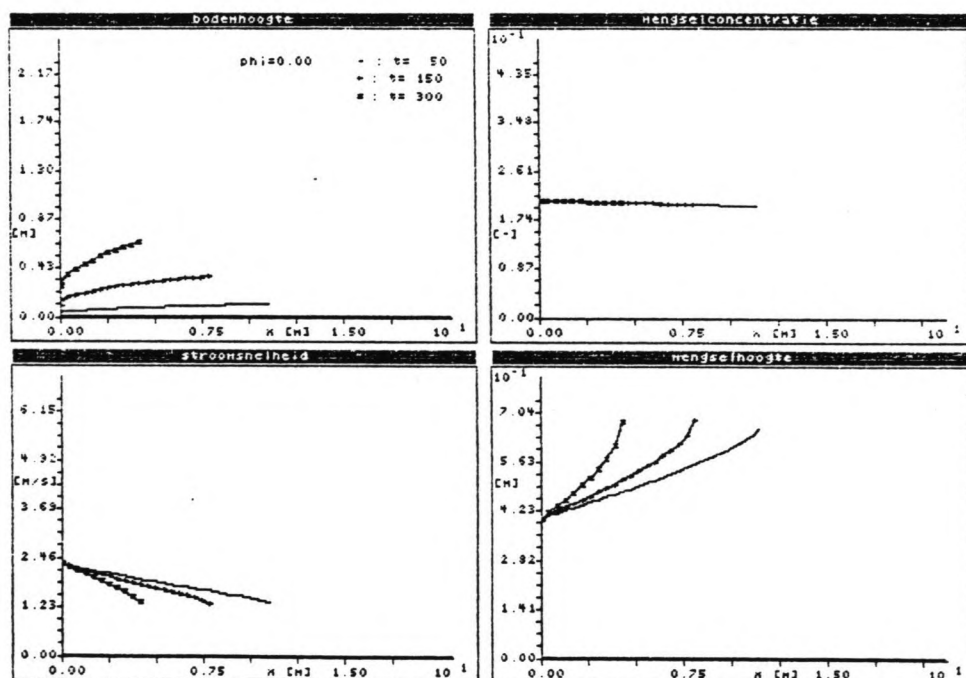


fig 9 Spuiten vertr. 1 - dim afstroming

2. Praktijkgeval klappen; hierbij zijn de waarden van de "Davis" meting gebruikt: "evaluatie nota grondverbetering, nota 24 EGRO - m81042 - RWS 1982" (zie fig 10 en 11). Het blijkt dat de berekening goed overeenkomt met de meting tot de watersprong; deze treedt bij de meting al na 50 m op en bij de berekening pas na ca 120 m (overigens niet op deze figuur te zien). Mogelijke oorzaken voor dit verschil zijn: geen wateropname door mengselstroming in de berekening, verkeerde wrijvingscoëfficiënten of een verkeerde beginconcentratie van de afstroming.

waterdiepte= 40.00 m
d50= 200 μ

beginsnelh= 2.700 m/s beginhoogte= 2.400 m beginconco= 0.013
dx= 0.50 m dt=150.0 sec

raailengte= 100 m bouw tijd= 900 sec

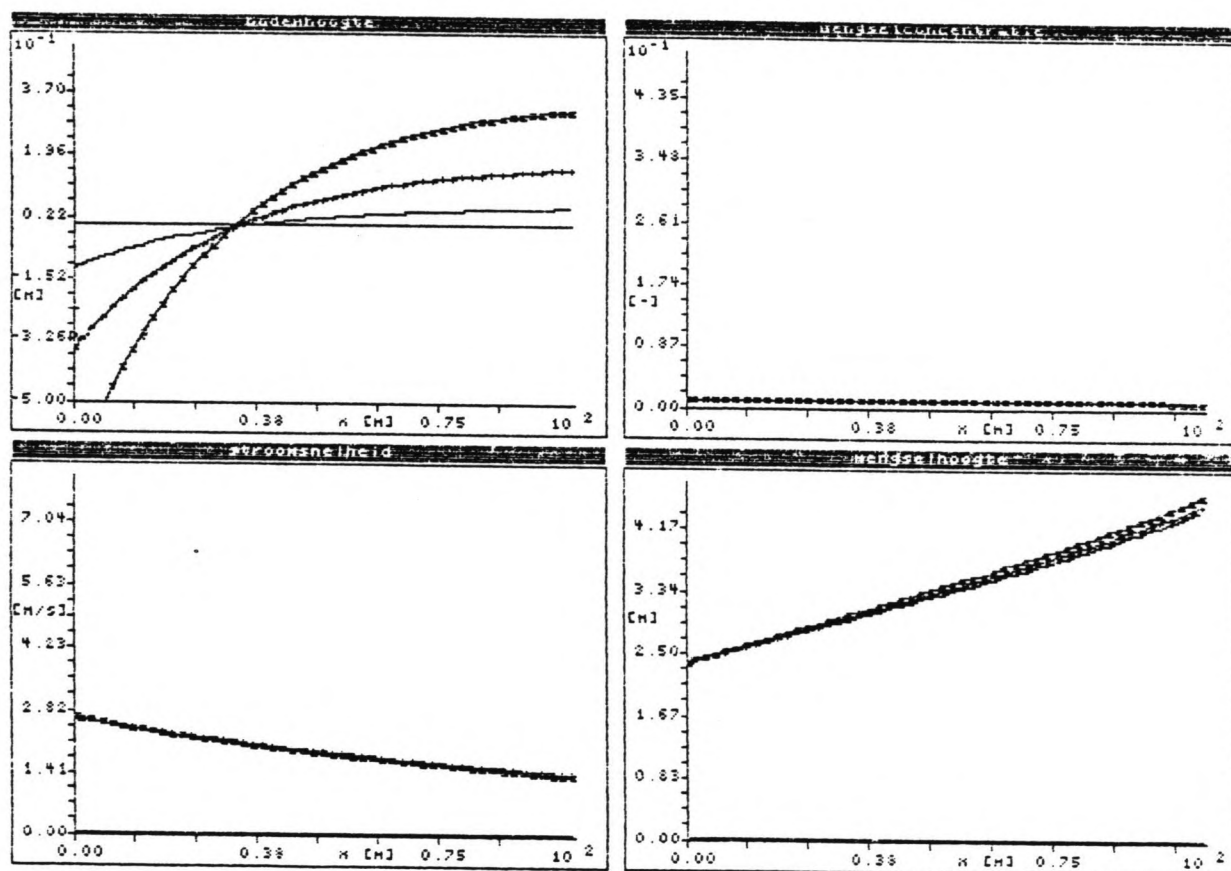


fig 10 Klappen, 1 dim afstroming

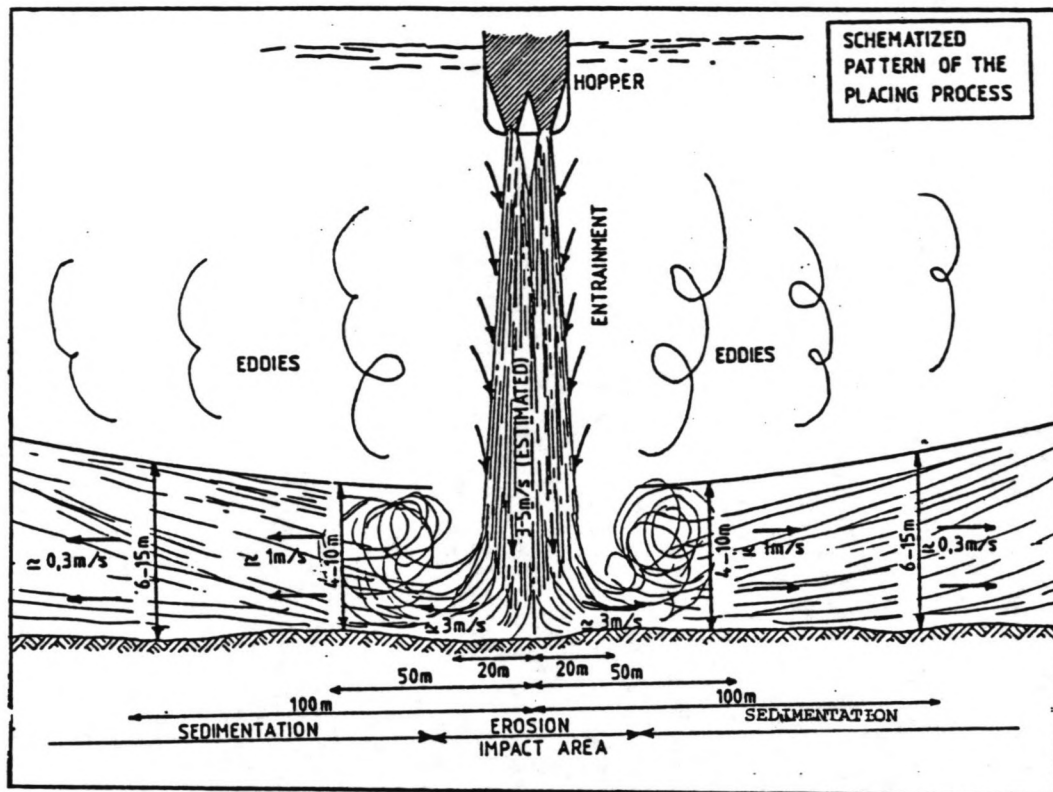
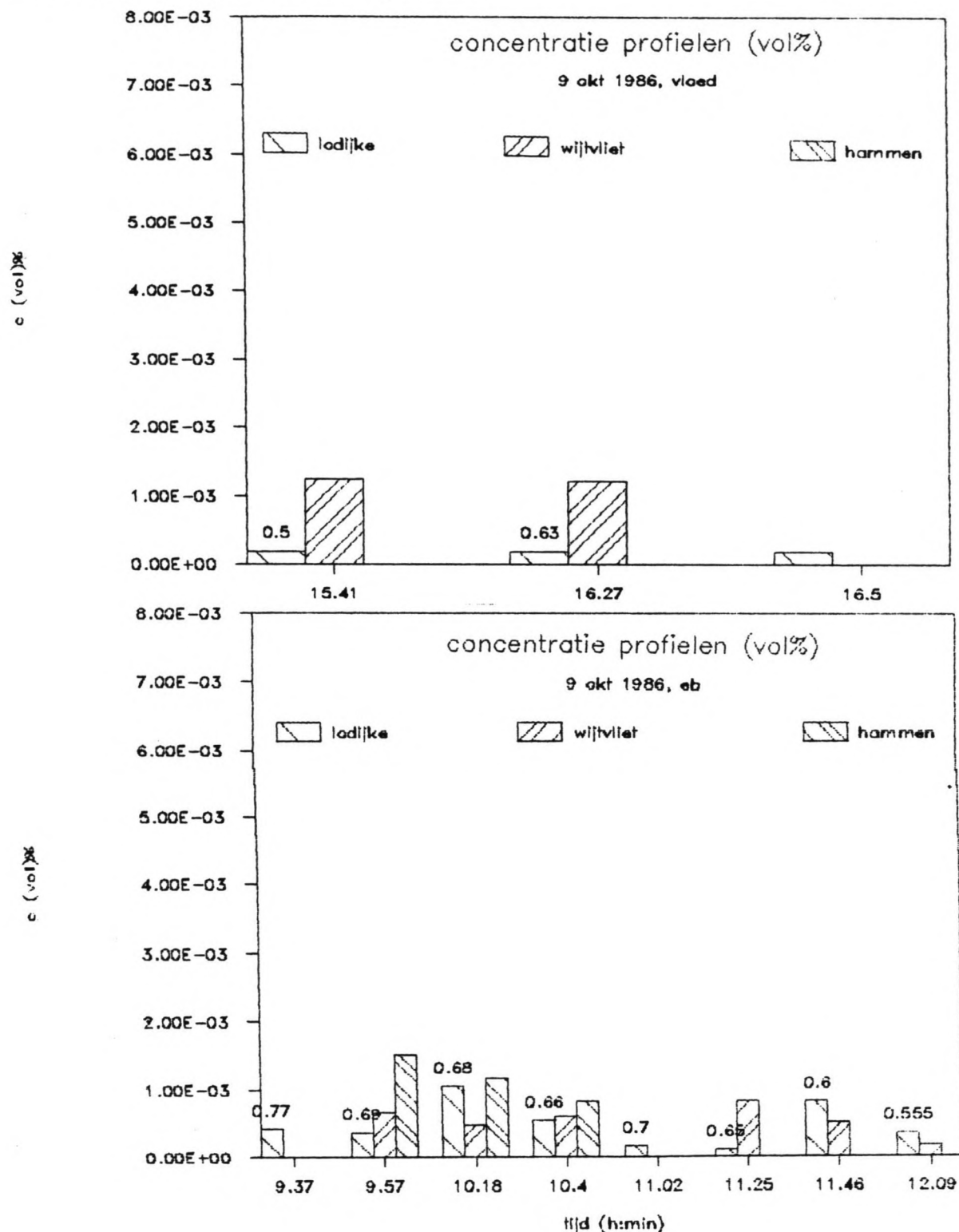


fig 11 Fysisch proces klappen (lit 7)

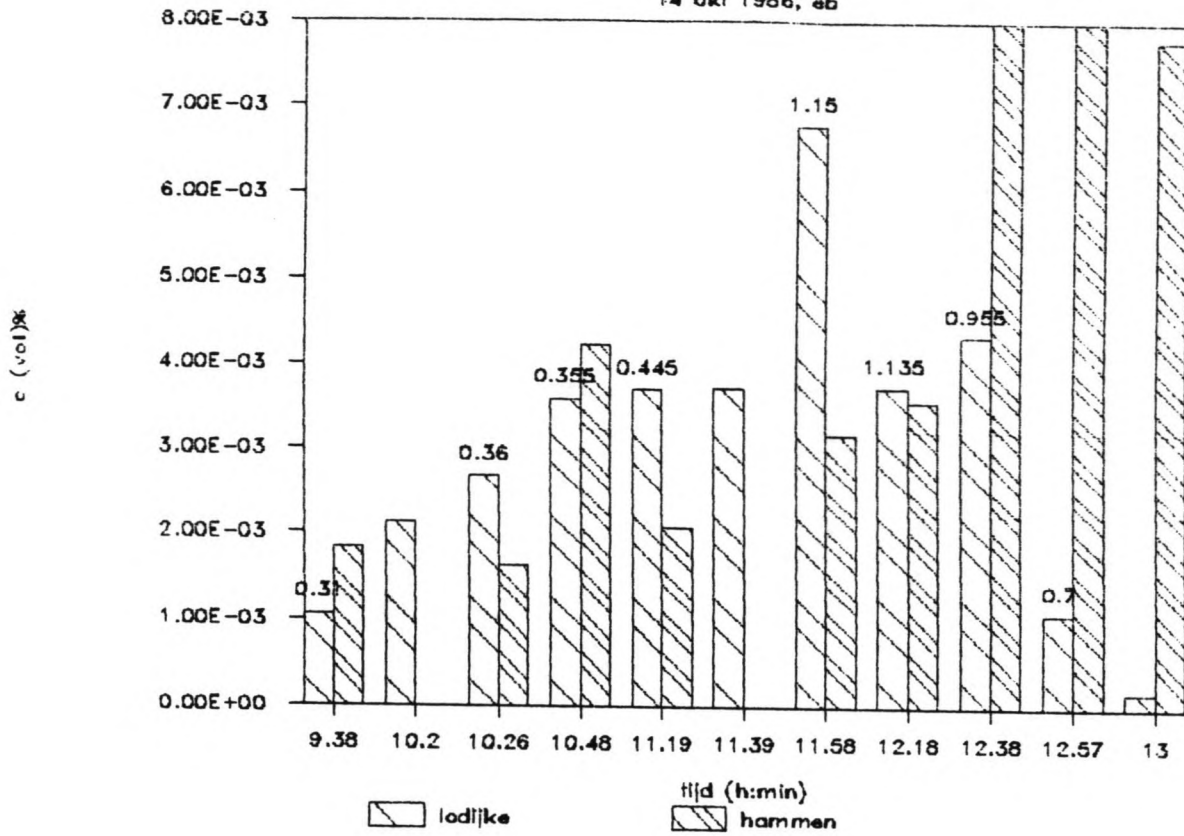
BIJLAGE 2: MEETGEGEVENS THOLENSE GAT

Op de horizontale as staat uitgezet het tijdstip van de meting en op de verticale as de volume concentratie (m^3 zandkorrels/ m^3 water $\times 100\%$, gemiddeld over de diepte). De stroomsnelheid in het sluitgat staat, voor zover gemeten, vermeld bij de histogramblokkjes. Lodijke, Hammen en Wijtvliet zijn namen van meetboten, waarvan de lokaties in figuur 8 staan getekend.



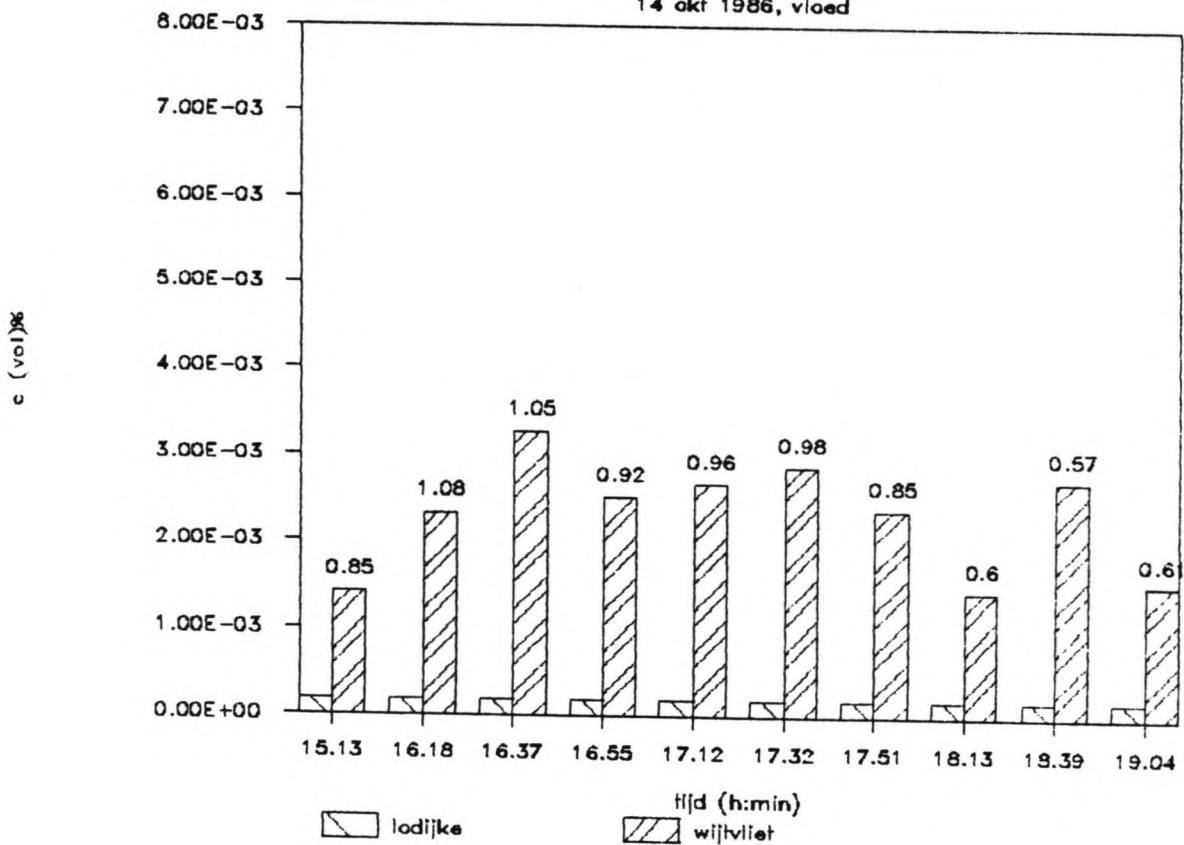
concentratie profielen (vol%)

14 okt 1986, eb

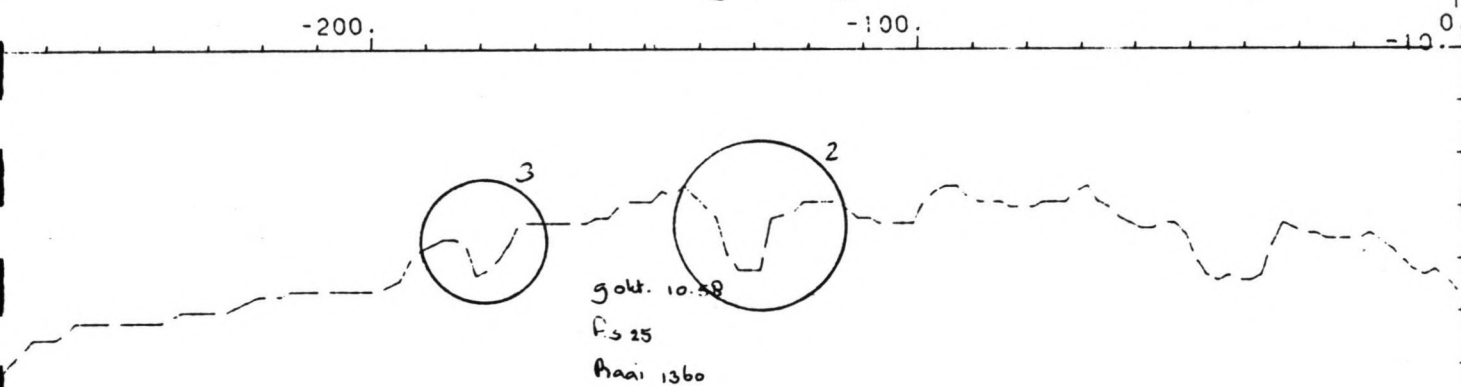
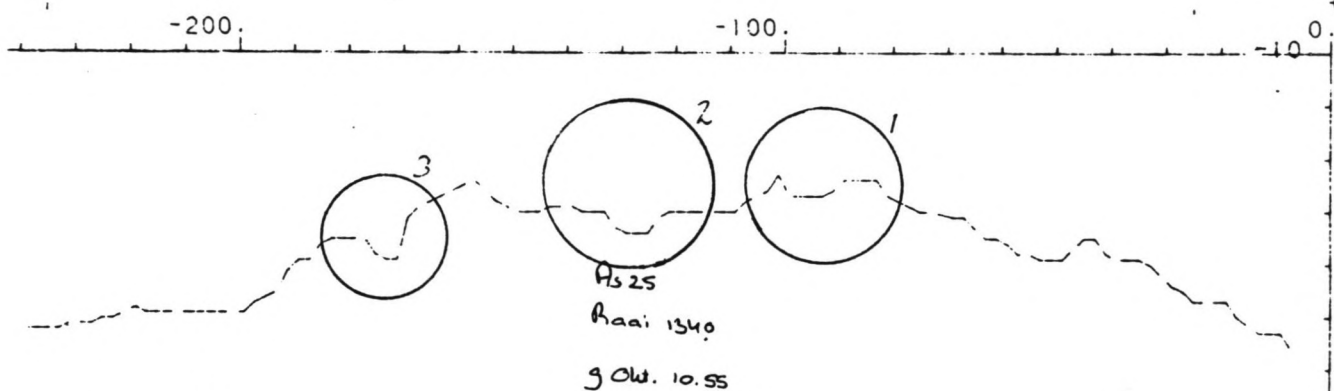
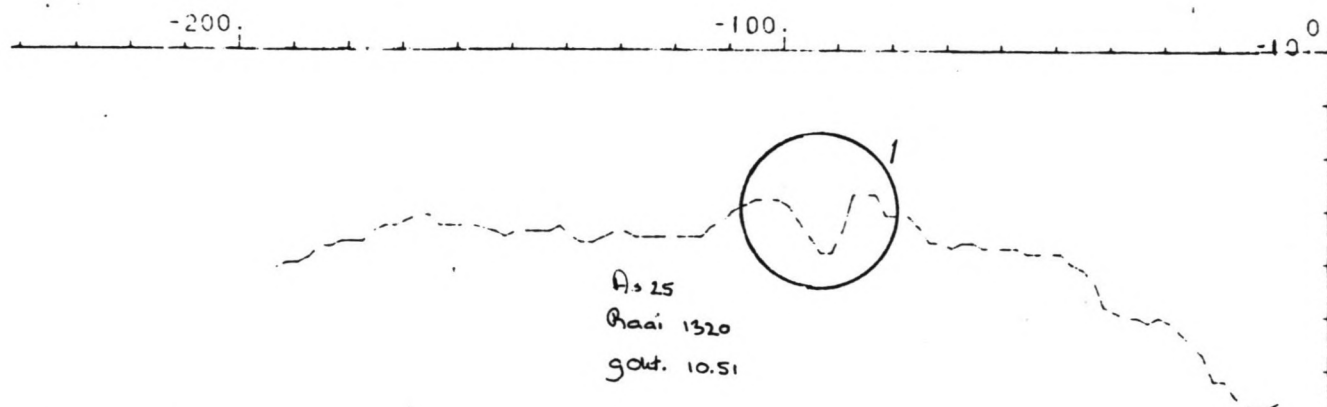


concentratie profielen (vol%)

14 okt 1986, vloed



BIJLAGE 3: BODEMVORM THOLENSE GAT



-20.

BIJLAGE 4: PROGRAMMALISTING

```

program berm2t2 (input, output);
{$! typedef.sys}
{$! graphix.sys}
{$! kernel.sys}
{$! windows.sys}
{$! axis.hgh}
{$! polygon.hgh}
label 1000,2000;
const g=9.81;nn=5000;
var rw,rs,fi,fo,rm,hm,um,ge,alfa,cosalf,sinalf,ws,
    wo,det,dx,dt,drm,dhm,dum,tb,ti,cm,cb,rb,l,nmin,nu,
    d50,delta,eros,sed,
    opn,verd,frint,verl,tverl,prod,rmo,hmo,umo,tberm,
    cmo, b1,b2,b3,a11,a12,a13,a21,a22,a23,a31,a32,a33,
    deta,detb,rma,hma,uma,drma,dhma,duma,xo,x,udwars,
    phi,cosfi,sinfi,qo,dbuis,rverl,vb,qx,eps,ie,ue,wmk,wmx,
    cmt,umt,hmt,t,rsubv,sosubv,maxbr,ust,zet,zh,wd,capkol,ch,
    skol,totverl,tas,tat,tap,tsubv,hbi
    :real;
z,pa,code,q,i,j,n,m,k,o:integer;
draf,gr,sv:char;
hb:array [0..nn] of real;
atverl,asosubv,apotverl,atotverl:array[1..100] of real;
codes,tijd,numtext:wrkstring;
a,b,c,d:plotarray;
graf:boolean;
procedure determ (var c11,c12,c13,c21,c22,c23,c31,c32,c33:real);
begin
    det:=c11*c22*c33+c31*c12*c23+c21*c32*c13-c31*c22*c13-c11*c23*c32-
        c12*c21*c33;
end;
procedure diff;
begin
    a11:=hm*um;
    a12:=rm*um;
    a13:=rm*hm;
    a21:=hm*sqr(um)+ge*cosalf/2*sqr(hm);
    a22:=rm*sqr(um)+ge*cosalf*hm*rm;
    a23:=2*um*hm*rm;
    a31:=hm*um;
    a32:=(rm-rw)*um;
    a33:=(rm-rw)*hm;
    b1:=rb*(eros-sed)-rm*opn+rw*verd-rm*hm*um/x;
    b2:=rm*hm*ge*sinalf-tb-ti-(rm*hm*sqr(um)+cosalf/2*ge*rm*sqr(hm))/x;
    b3:=(rb-rw)*(eros-sed)-(rm-rw)*opn-(rm-rw)*hm*um/x;
    determ(b1,a12,a13,b2,a22,a23,b3,a32,a33);
    detb:=det;
    determ(a11,a12,a13,a21,a22,a23,a31,a32,a33);
    deta:=det; drm:=detb/deta;
    determ(a11,b1,a13,a21,b2,a23,a31,b3,a33);
    detb:=det; dhm:=detb/deta;
    determ(a11,a12,b1,a21,a22,b2,a31,a32,b3);
    detb:=det; dum:=detb/deta;
end;

```

```

procedure uitvoer;
begin
  if i<=n then
    begin
      writeln(1st);
      write(1st,' t=',dt*j:8); write(1st,'      x=',x:8);
      writeln(1st,'      phi=',phi:8);
      write(1st,' um=',um:9); write(1st,'      hm=',hm:9);
      writeln(1st,'      rm=',rm:9);
      write(1st,' froude intern=',frint:9);
      write(1st,'      bodemhoogte=',hb[i]:9);
    end;
end;
procedure teken;
begin
  if i<=n then
    begin
      a[q,1]:=x;
      a[q,2]:=hb[i];
      b[q,1]:=x;
      b[q,2]:=cm;
      c[q,1]:=x;
      c[q,2]:=um;
      d[q,1]:=x;
      d[q,2]:=hm;
      q:=q+1;
    end;
end;
function fz(zh:real):real;
begin
  fz:=exp(ln((wd-zh)/zh)*zet);
end;
begin
  clrscr;
  writeln(' wordt er een schotel gebruikt?');
  read(sv); writeln;
  if sv='j' then
    begin
      writeln(' debiet, diameter buis [m]?');
      read(qo,dbuis); writeln;
      writeln(' straal schotel, beginconcentratie ?');
      read(xo,cmo); writeln;
      umo:=qo/(pi*sqr(dbuis)); hmo:=qo/(2*pi*xo*umo);
    end
  else
    begin
      writeln(' gegevens op de rand van de woelkrater moeten');
      writeln(' worden gebruikt. ');
      writeln(' snelheid, hoogte, concentratie ?');
      read(umo,hmo,cmo); writeln;
      writeln(' straal woelkrater ?');
      read(xo); writeln;
    end;
  qo:=umo*hmo*xo*2*pi;
  rw:=1000; rs:=2650;

```

```

fi:=0.03; fo:=0.1;
nu:=1.14e-6;
writeln(' d50, dwarsstroomsnelheid, waterdiepte ?');
read (d50,udwars,wd); writeln;
writeln(' maxstraal,n,bouwtijd,m ? (n: veelvoud van 50)');
read (l,n,tberm,m);writeln;
writeln(' aantal circelsegmenten ? (veelvoud van vier)');
read(o);writeln;
writeln(' grafische uitvoer ? (j/n)');
read(gr); writeln;
writeln(' hardcopy ? (j/n)');
read(draf);
cb:=0.6;prod:=cmo*qo/cb;
dx:=(1-xo)/n; dt:=tberm/m;
vb:=0.001;
delta:=(rs-rw)/rw; rb:=rw*(1+delta*cb);
rmo:=rw*(1+delta*cmo);
wo:=10*nu/d50*(sqrt(1+(delta*g*d50*d50*d50)/(100*sqr(nu)))-1);
writeln(lst);writeln(lst);
if sv='j' then writeln(lst,'
                                MET SCHOTEL')
                else writeln(lst,'
                                ZONDER SCHOTEL');
if udwars<0.00001 then writeln(lst,'
                                GEEN DWARSSTROOM')
                    else writeln(lst,'
                                MET DWARSSTROOM');
writeln(lst);writeln(lst,'debiet= ',qo:5:2,' m3/sec');
writeln(lst,'produktie= ',prod:5:2,' m3 zand /sec');
if sv='j' then
begin
    writeln(lst,'straal schotel= ',xo:5:2,' m');
    writeln(lst,'buisdiameter= ',dbuis:5:3,' m')
end else writeln(lst,'straal krater= ',xo:5:2,' m');
writeln(lst,'dwarssnelheid= ',udwars:5:2,' m/s');
writeln(lst,'waterdiepte= ',wd:6:2,' m');
writeln(lst,'d50= ',d50*1e6:4:0,' mu');writeln(lst);
writeln(lst,'beginsnelh= ',umo:6:3,' m/s',' beginhoogte= ',hmo:5:3,
' m',' beginconc= ',cmo:5:3);
writeln(lst,'dx= ',dx:5:2,' m',' dt= ',dt:5:1,' sec',
' dphi= ',2*pi/o:4:2); writeln(lst);
writeln(lst,'raailengte= ',l-xo:4:0,' m bouwtijd= ',tberm:4:0,' sec');
writeln(lst);writeln(lst);
ust:=udwars*sqr(fi/8);
if udwars>0.0001 then zet:=wo/(0.4*ust) else zet:=10;
ch:=cmo/(1+0.4*zet*sqr(8/fi));
capkol:=ch*exp(ln(0.05)*zet)*wd/18*(fz(wd/20)+4*fz(0.217*wd)+2*fz(0.383*wd)
+4*fz(0.55*wd)+2*fz(0.717*wd)+4*fz(0.883*wd));
skol:=0.05*exp(ln(fo/8)*1.5)*sqr(udwars)*sqr(udwars)/(sqr(delta*g)*d50);
tverl:=0;pa:=1;sosubv:=0;totverl:=0;tat:=0;tas:=0;tap:=0;tsubv:=0;
for j:=1 to 100 do
begin
    atverl[j]:=0;
    asosubv[j]:=0;
    apotverl[j]:=0;
    atotverl[j]:=0;
end;
for k:=1 to o do
begin

```

```

phi:=(k-1)*2*pi/o;
for i:=1 to (n+1) do hb[i]:=0;
if sv<>'j' then
begin
  for i:=1 to n+1 do hb[i]:=0.667*exp(-(i-1)*dx);
end;
if gr='j' then
begin
  initgraphic;
  str(phi:4:2,numtext);
  code:=0;
  definewindow(1,1,4,trunc(xmaxglb/2)-1,trunc(ymaxglb/2)-2);
  defineheader(1,'bodemhoogte');
  defineworld(1,xo,0,1,2.5);
  selectworld(1);
  selectwindow(1);
  setheaderon; drawborder;
  axisglb:=true;
  drawaxis(7,6,0,0,0,0,0,0,false);
  drawtext(9,trunc(ymaxglb/3),1,'[m]');
  drawtext(175,trunc(ymaxglb/2)-9,1,'x [m]');
  drawtextw(10,0.25,1,'phi='+numtext);
  definewindow(2,trunc(xmaxglb/2)+1,4,xmaxglb-1,trunc(ymaxglb/2)-2);
  defineheader(2,'mengselconcentratie');
  defineworld(2,xo,0,1,0.5);
  selectworld(2);
  selectwindow(2);
  setheaderon; drawborder;
  axisglb:=true;
  drawaxis(7,6,0,0,0,0,0,0,false);
  drawtext(322,trunc(ymaxglb/3),1,'[-]');
  drawtext(490,trunc(ymaxglb/2)-9,1,'x [m]');
  definewindow(3,1,trunc(ymaxglb/2)+2,trunc(xmaxglb/2)-1,ymaxglb-4);
  defineheader(3,'stroomsnelheid');
  defineworld(3,xo,0,1,umo*3);
  selectworld(3);
  selectwindow(3);
  setheaderon; drawborder;
  axisglb:=true;
  drawaxis(7,6,0,0,0,0,0,0,false);
  drawtext(9,trunc(ymaxglb*2/3)+12,1,'[m/s]');
  drawtext(175,ymaxglb-11,1,'x [m]');
  definewindow(4,trunc(xmaxglb/2)+1,trunc(ymaxglb/2)+2,xmaxglb-1,
ymaxglb-4);
  defineheader(4,'mengselhoogte');
  defineworld(4,xo,0,1,hmo*2);
  selectworld(4);
  selectwindow(4);
  setheaderon; drawborder;
  axisglb:=true;
  drawaxis(7,6,0,0,0,0,0,0,false);
  drawtext(322,trunc(ymaxglb*2/3)+12,1,'[m]');
  drawtext(490,ymaxglb-11,1,'x [m]');
end;
for j:=1 to m do

```

```

begin
  hb[0]:=hb[1]; rm:=rmo; um:=umo; hm:=hmo; cm:=cmo; q:=2;
  rverl:=0; rsubv:=0;
  a[1,1]:=xo;
  a[1,2]:=hb[0];
  b[1,1]:=xo;
  b[1,2]:=cmo;
  c[1,1]:=xo;
  c[1,2]:=umo;
  d[1,1]:=xo;
  d[1,2]:=hmo;
  str(dt*j:4:0,tijd);
  for i:=1 to (n+1) do
    begin
      x:=xo+(i-1)*dx;
      alfa:= arctan((hb[i]-hb[i+1])/dx);
      cosalf:=cos(alfa); sinalf:=sin(alfa);
      cosfi:=cos(phi); sinfi:=sin(phi);
      cm:=(rm-rw)/(rs-rw);
      ws:=wo*cosalf*sqr(1-cm)*sqr(1-cm);
      ge:=g*(rm-rw)/rm;
      qx:=qo/(2*pi*x);
      eps:=delta*cm/(1+delta*cm);
      ie:=exp(ln((fo+fi)/8)*0.1)*exp(ln(sqr(delta)*cm*d50*20)*0.6)*
        exp(ln(g)*0.2)/exp(ln(qx)*0.4)/eps;
      ue:=exp(ln(qx*cm*d50*20)*0.2)*exp(ln(8/(fo+fi))*0.3)*exp(ln
        (delta*g)*0.4);
      wmk:=rm*(1+delta*cm)*eps*g*ie*ue;
      wmx:=rm*sqr(um)*sqr(um)/qx*(fo+fi)/8;
      eros:=wmx/wmk*ws*cm/cb;
      sed:=ws*cm/cb;
      opn:=0.125*fi*sqrt(sqr(um+udwars*cosfi)+sqr(udwars*sinfi));
      verd:=0;
      verl:=opn*dx*cm*2*pi/oxx*dt; if i<=n then rverl:=rverl+verl;
      opn:=0;
      frint:=sqr(um)/(ge*hm);
      if frint<=1 then goto 1000;
      hb[i]:=hb[i]+((sed-eros)*dt);
      if (i/(n/50) = trunc(i/(n/50))) or (i=n) or (i=1) then
        begin
          if (j/3 = trunc(j/3)) or (j=m) or (j=1) then
            begin
              if (abs(phi-pi/2)<0.0001) or (abs(phi-pi)<0.0001) or
                (abs(3/2*pi-phi)<0.0001) or (abs(phi)<0.0001) then
                begin
                  if (gr='j') then
                    taken else uitvoer;
                end;
              end;
            end;
          end;
        end;
      tb:=0.125*rm*sqr(um)*fo;
      ti:=0.125*rm*fi*(um+udwars*cosfi)*abs(um+udwars*cosfi);
      rma:=rm; hma:=hm; uma:=um;
      diff;
      drma:=drm; dhma:=dhm; duma:=dum;
    end
  end
end

```

```

rm:=dx*drm+rm;
hm:=dx*dhm+hm;
um:=dx*dum+um;
diff;
rm:=dx/2*(drma+drm)+rma;
hm:=dx/2*(dhma+dhm)+hma;
um:=dx/2*(duma+dum)+uma;
if (rm-rw) < 1 then goto 2000;
if hm < 0.01 then goto 2000;
end;
goto 2000;
1000:
begin
  if gr<>'j' then writeln(lst,'stroming wordt subkritisch');
  rsubv:=cm*um*x*2*pi/o*hm*dt;
end;
2000: if gr<>'j' then
begin
  writeln
  (lst,'einde berekening raai voor deze tijdstap');
  writeln(lst);
end;
tsubv:=tsubv+rsubv;
tverl:=tverl+rverl;
atverl[j]:=atverl[j]+rverl;
if (k=o/4+1) or (o=1) then
begin
  maxbr:=2*x;
  apotverl[j]:=maxbr*dt*(capkol-skol)*udwars;
end;
if (k<=o/4) and (k>1) then asosubv[j]:=asosubv[j]+rsubv;
if (k=o/4+1) or (k=1) then asosubv[j]:=asosubv[j]+rsubv/2;
if (j/3 = trunc(j/3)) or (j=m) or (j=1) then
begin
  if (abs(phi-pi/2)<0.0001) or (abs(phi-pi)<0.0001) or
  (abs(3/2*pi-phi)<0.0001) or (abs(phi)<0.0001) then
  begin
    if (gr='j') then
    begin
      selectworld(1);
      selectwindow(1);
      str(code:1,codes);
      if code=0 then
        drawtextw(15,code/7+0.25,1,'- : '+' t='+tjtd) else
        drawtextw(15,code/7+0.25,1,chr(27)+codes+' : '+' t='+tjtd);
      axisglb:=true;
      if q>=4 then drawpolygon(a,1,-(q-1),code,1,0);
      selectworld(2);
      selectwindow(2);
      axisglb:=true;
      if q>=4 then drawpolygon(b,1,-(q-1),code,1,0);
      selectworld(3);
      selectwindow(3);
      axisglb:=true;
      if q>=4 then drawpolygon(c,1,-(q-1),code,1,0);

```

```

        selectworld(4);
        selectwindow(4);
        axisglb:=true;
        if q>=4 then drawpolygon(d,1,-(q-1),code,1,0);
        code:=code+1;
    end;
end;
end;
end;
if gr<>'j' then
begin
    writeln(1st,'potentiele verlies raai ',k:2,'= ',rverl:9);
    writeln(1st);
end;
if gr='j' then
begin
    if (abs(phi-pi/2)<0.0001) or (abs(phi-pi)<0.0001) or
    (abs(phi)<0.0001) then
    begin
        if draf='j' then hardcopy(false,4);
        writeln(1st);
        if (pa=1) and (draf='j') then
        begin
            for z:=1 to 16 do writeln(1st);
        end;
        if (pa=2) and (draf='j') then
        begin
            for z:=1 to 30 do writeln(1st);
        end;
        pa:=pa+1;
    end;
end;
end;
leavegraphic;
for j:=1 to m do
begin
    asosubv[j]:=asosubv[j]*2;
    tap:=tap+apotverl[j];
end;
writeln(1st);
writeln(1st,'totale produktie=',tberm*prod:7:2,' m3 zand');
writeln(1st,'totale produktie=',tberm*qo*cmo:7:2,' m3 zandkorrels');
writeln(1st);
writeln(1st,'totaal naar subkr stroming=',tsubv:6:2,' m3 zandkorrels');
writeln(1st,'mogelijke opwerveling=',tverl:6:2,' m3 zandkorrels');
writeln(1st);
writeln(1st,'capaciteit van ongestoorde bovenlaag=',skol:8,' m3 zandkorrels/m2');
writeln(1st,'capaciteit boven mengselstroming=',capkol:8,' m3 zandkorrels/m2');
writeln(1st,'verliescapaciteit boven stroming=',tap:6:2,' m3 zandkorrels');
writeln(1st);
if skol<capkol then
begin
    for j:=1 to m do
    begin
        if asosubv[j]>=apotverl[j] then

```

```

begin
  totverl:=apotverl[j]+totverl;
  tas:=tas+apotverl[j];
end else
begin
  if apotverl[j]<(asosubv[j]+atverl[j]) then
  begin
    tas:=tas+asosubv[j];
    totverl:=totverl+apotverl[j];
    tat:=tat+(apotverl[j]-asosubv[j]);
  end else
  begin
    totverl:=totverl+asosubv[j]+atverl[j];
    tas:=tas+asosubv[j];
    tat:=tat+atverl[j];
  end
end
end;
end;
if skol>capkol then writeln(1st,'verlies= 0 m3 zandkorrels') else
begin
  writeln(1st,'totale verlies=',totverl:6:2,' m3 zandkorrels');
  writeln(1st,'verlies door subkr. stroming=',tas:6:2,' m3 zandkorrels');
  writeln(1st,'verlies door opwerveling=',tat:6:2,' m3 zandkorrels');
end;
writeln(1st);
writeln(1st,' einde berekening');
writeln(1st);
end.

```

BIJLAGEN 5: BEREKENINGSRESULTATEN

Verklaring van de symbolen bij de grafieken:

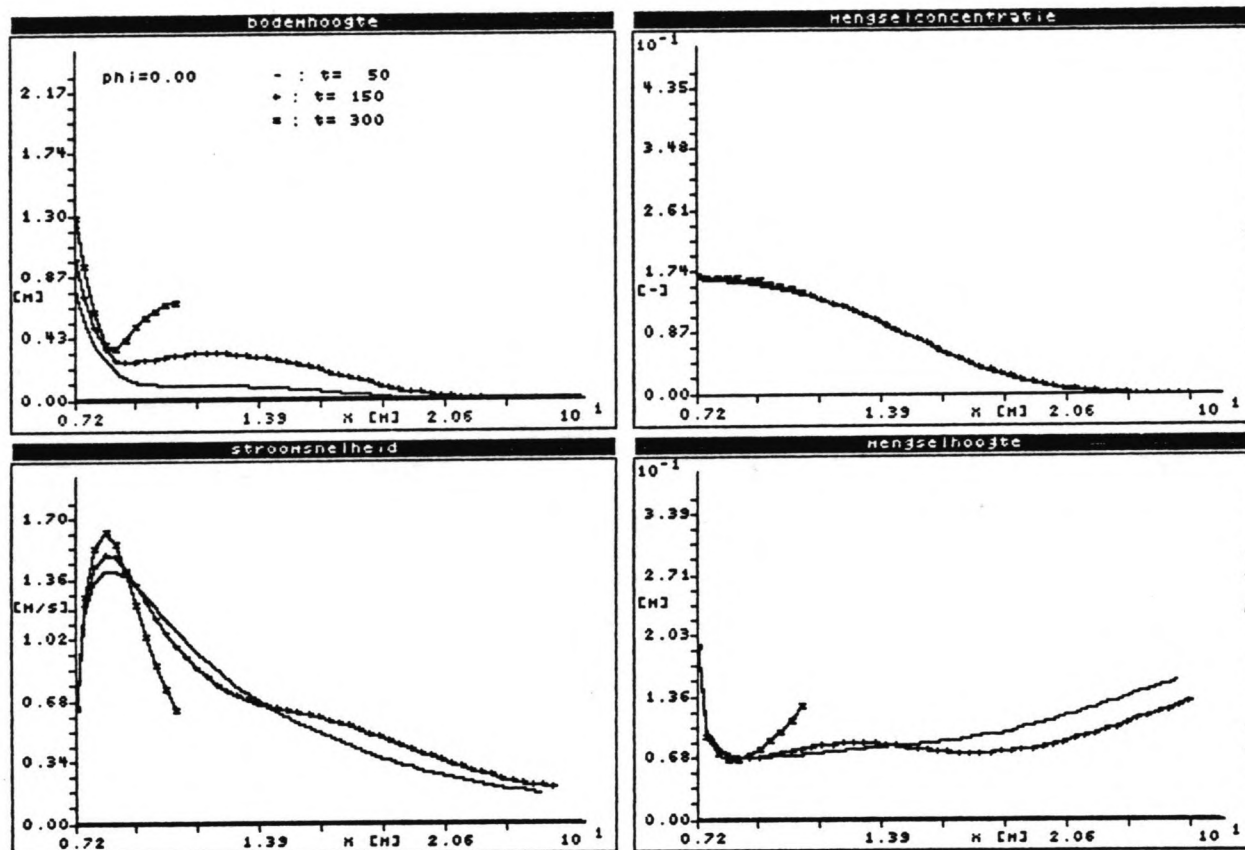
- blok "bodemhoogte": - horizontale as: afstand tot kraterrand of schotelrand in meters; de getallen op de as geven decameters aan.
- verticale as: hoogte boven oorspronkelijke bodem in meters
 - ϕ : hoek ϕ die de in dit blok berekende raai maakt tov. de richting van de dwarsstroom (zie fig 4, blz 9)
 - t: tijd die verlopen is sinds het begin van het stortproces
- blok "mengselconcentratie": - horizontale as: afstand tot kraterrand of schotelrand in meters; de getallen op de as geven decameters aan.
- verticale as: volumeconcentratie van het mengsel (korrelvolume) voor verschillende tijdstippen
- blok "stroomsnelheid": - horizontale as: afstand tot kraterrand of schotelrand in meters; de getallen op de as geven decameters aan.
- verticale as: stroomsnelheid van het mengsel voor verschillende tijdstippen in m/s
- blok "mengselhoogte": - horizontale as: afstand tot kraterrand of schotelrand in meters; de getallen op de as geven decameters aan.
- verticale as: dikte van de laag voor verschillende tijdstippen in $m \times 10^{-1}$

BIJLAGE 5A: SPUITEN, GEEN DWARSSTROOM

debiet= 5.73 m³/sec
 produktie= 1.62 m³ zand /sec
 straal krater= 7.20 m
 dwarssnelheid= 0.00 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.195 m beginconc= 0.170
 dx= 0.02 m dt= 50.0 sec dphi=6.28

raailengte= 18 m bouwtijd= 300 sec



totale produktie= 487.39 m³ zand
 totale produktie= 292.44 m³ zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 38.23 m³ zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 81.97 m³ zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag= 0.00E+00 m³ zandkorrels/m²
 capaciteit boven mengselstroming= 1.02E-03 m³ zandkorrels/m²
 verliescapaciteit boven stroming= 0.00 m³ zandkorrels

totale verlies= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door opwerveling= 0.00 m³ zandkorrels

einde berekening

BIJLAGE 5B: SPUITEN, DWARSSTROOM = 0,3 M/S

debiet= 5.73 m3/sec
 produktie= 1.62 m3 zand /sec
 straal krater= 7.20 m
 dwarssnellheid= 0.30 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 mu

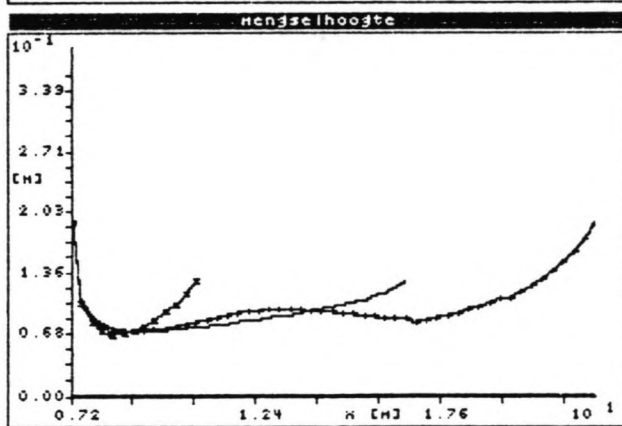
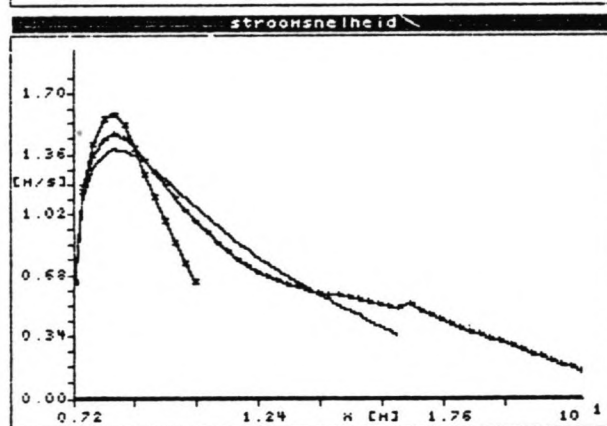
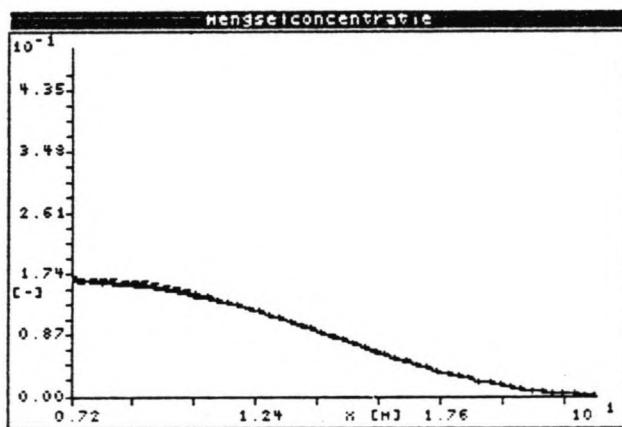
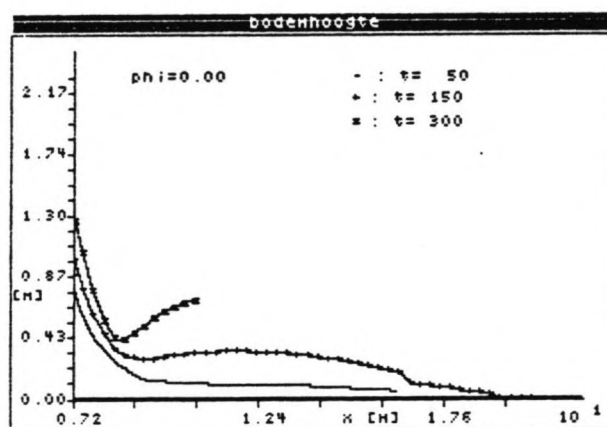
beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.195 m beginconc= 0.170
 dx= 0.01 m dt= 50.0 sec dphi=0.52
 raailengte= 14 m bouwttijd= 300 sec

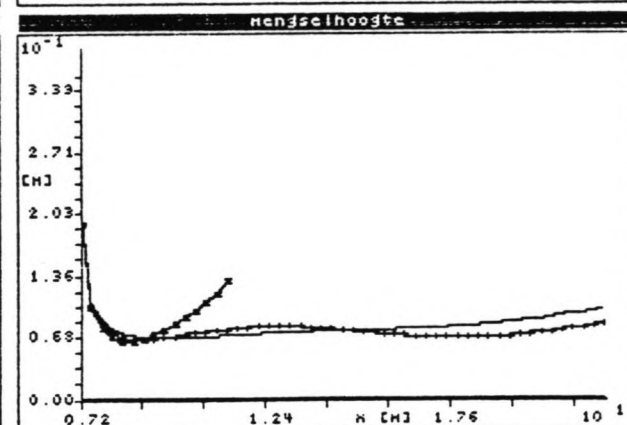
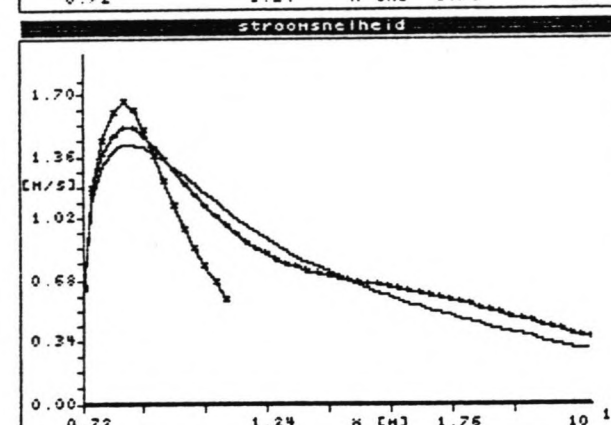
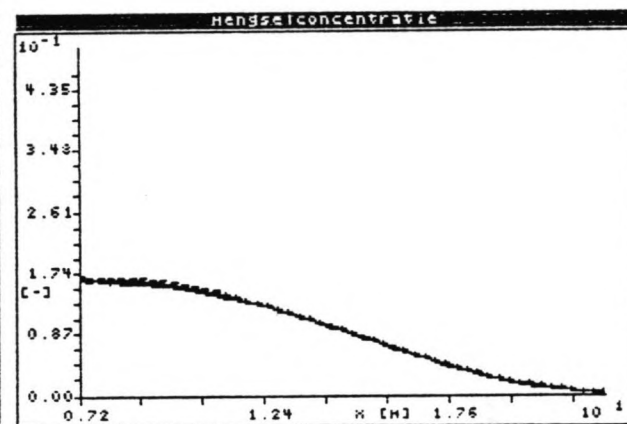
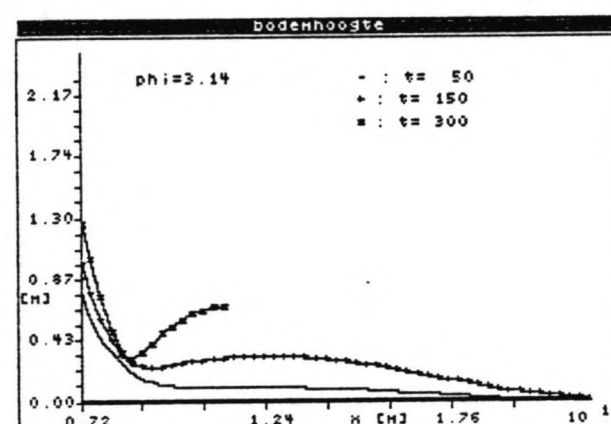
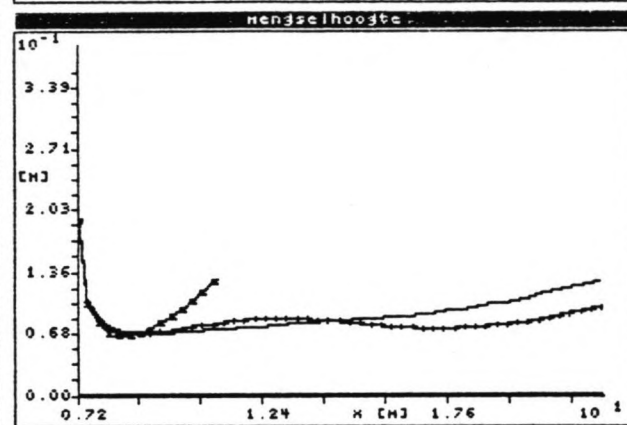
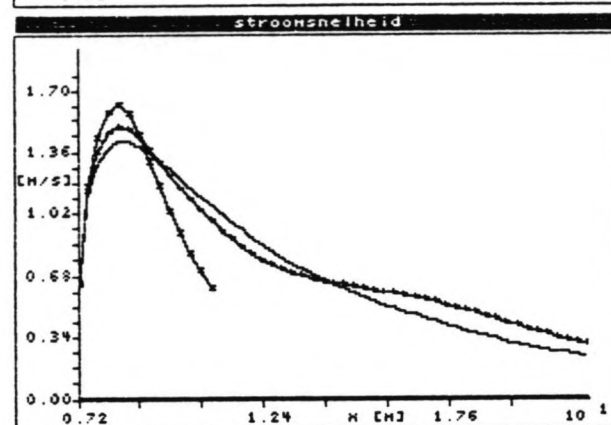
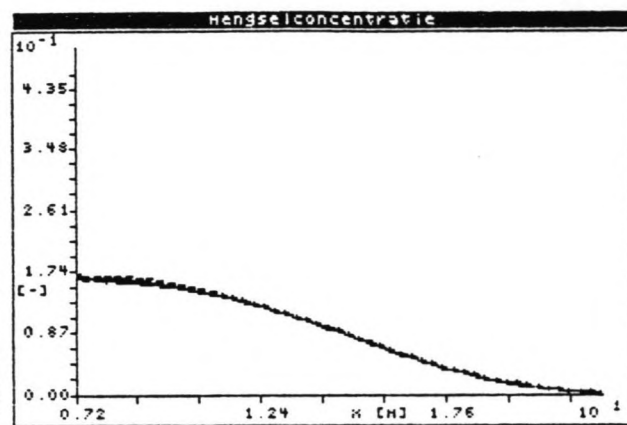
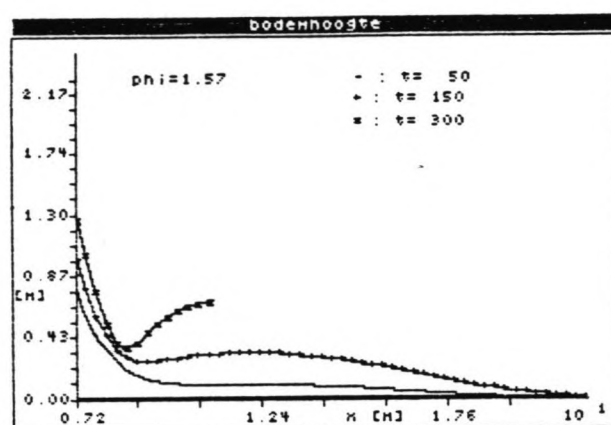
totale produktie= 487.39 m3 zand
 totale produktie= 292.44 m3 zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 40.85 m3 zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 82.67 m3 zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=1.17E-05 m3 zandkorrels/m2
 capaciteit boven mengselstroming=5.23E-03 m3 zandkorrels/m2
 verliescapaciteit boven stroming= 18.15 m3 zandkorrels

totale verlies= 18.15 m3 zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 4.67 m3 zandkorrels
 verlies door opwerveling= 13.47 m3 zandkorrels





BIJLAGE 5C: SPUITEN, DWARSSTROOM = 0,6 M/S

debiet= 5.73 m³/sec
 produktie= 1.62 m³ zand /sec
 straal krater= 7.20 m
 dwarsnelheid= 0.60 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.195 m beginconc= 0.170
 dx= 0.01 m dt= 50.0 sec dphi=0.52

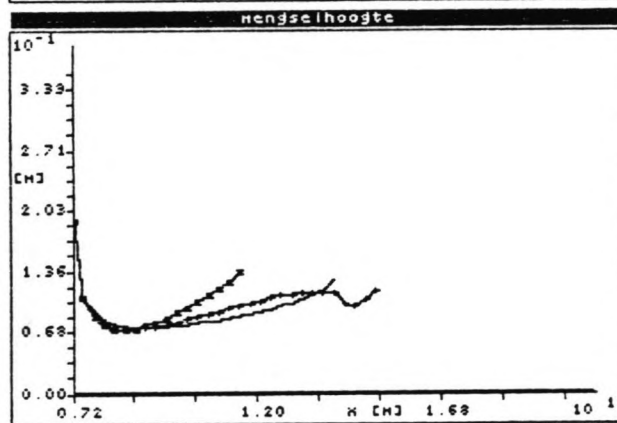
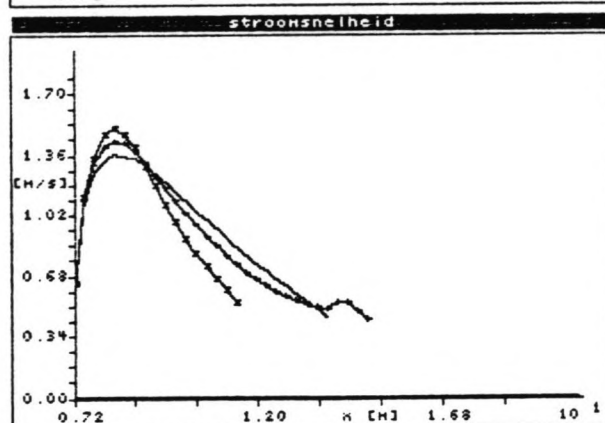
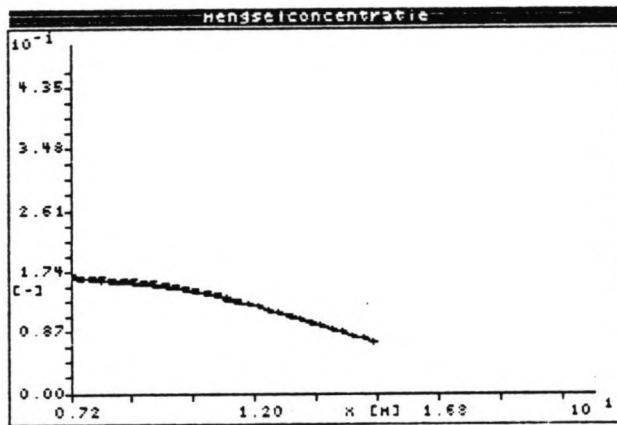
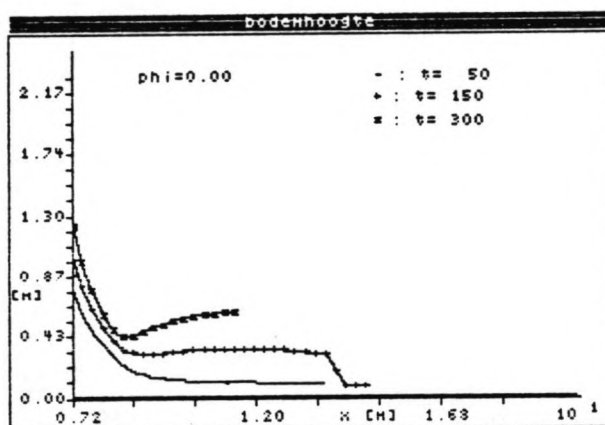
raailengte= 13 m bouwtijd= 300 sec

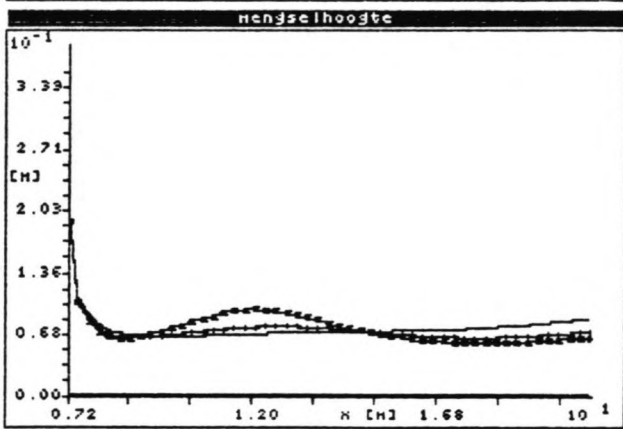
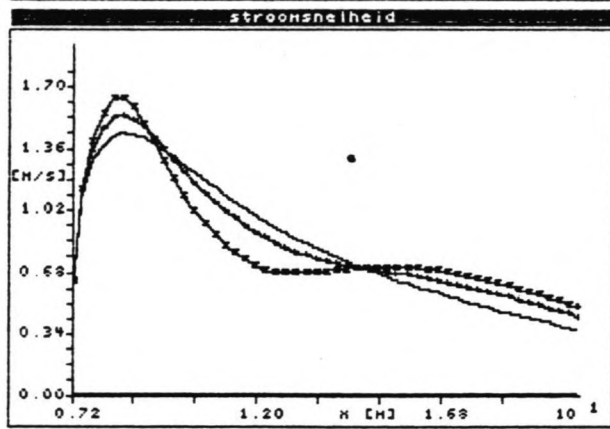
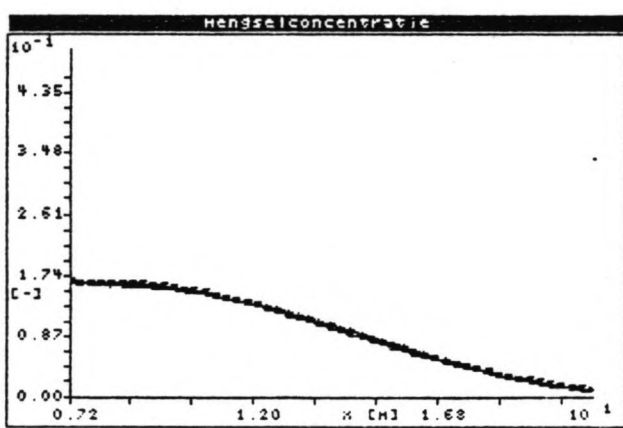
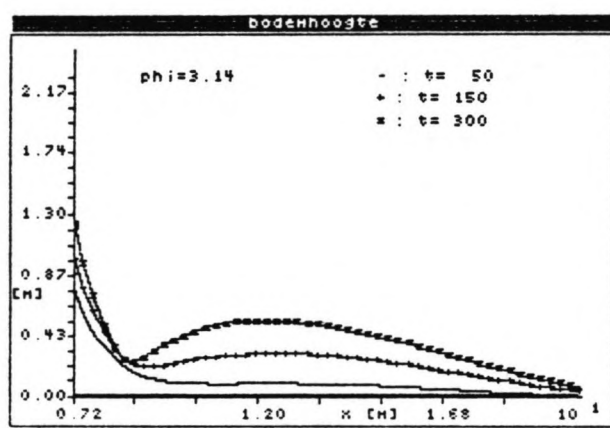
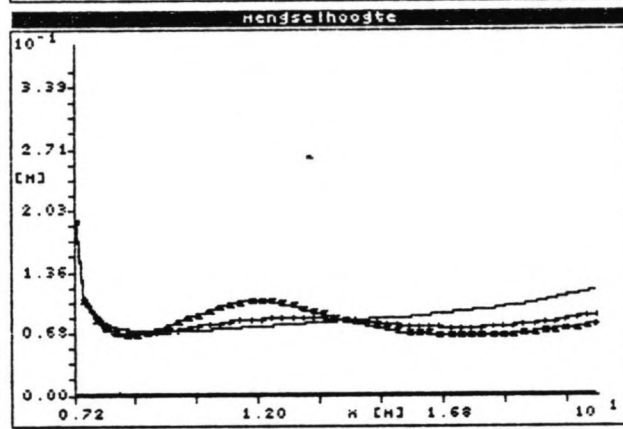
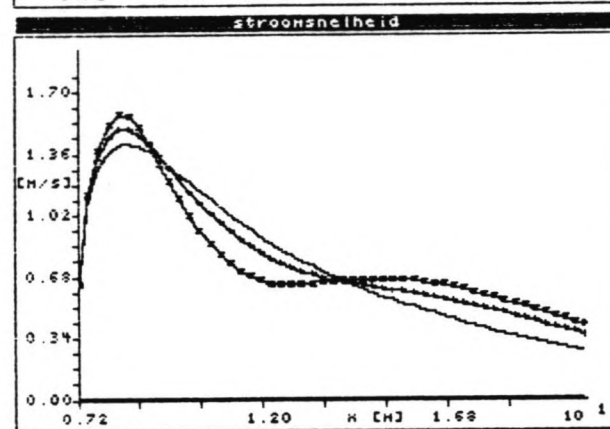
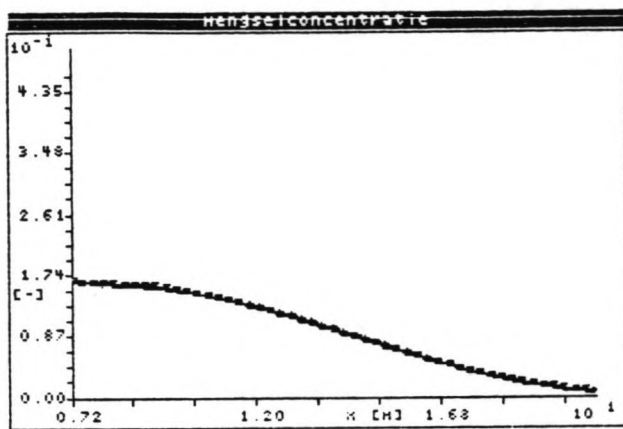
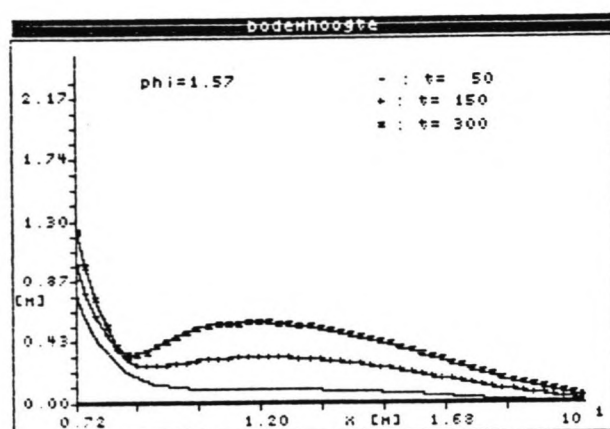
totale produktie= 487.39 m³ zand
 totale produktie= 292.44 m³ zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 70.16 m³ zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 77.72 m³ zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=1.87E-04 m³ zandkorrels/m²
 capaciteit boven mengselstroming=1.55E-02 m³ zandkorrels/m²
 verliescapaciteit boven stroming= 98.19 m³ zandkorrels

totale verlies= 98.19 m³ zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 28.15 m³ zandkorrels
 verlies door opwerveling= 70.04 m³ zandkorrels





BIJLAGE 5D: SPUITEN, DWARSSTROOM = 1 M/S

debiet= 5.44 m3/sec
produktie= 1.54 m3 zand /sec
straal krater= 7.20 m
dwarssnelheid= 1.00 m/s
waterdiepte= 12.00 m
d50= 185 mu

beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.185 m beginconc= 0.170
dx= 0.02 m dt= 50.0 sec dphi=0.52

raailengte= 18 m bouwtijd= 300 sec

totale produktie= 462.40 m3 zand
totale produktie= 277.44 m3 zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 73.41 m3 zandkorrels
mogelijke opwerveling= 88.23 m3 zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=1.44E-03 m3 zandkorrels/m2
capaciteit boven mengselstroming=4.37E-02 m3 zandkorrels/m2
verliescapaciteit boven stroming=546.01 m3 zandkorrels

totale verlies=143.52 m3 zandkorrels
verlies door subkr. stroming= 55.28 m3 zandkorrels
verlies door opwerveling= 88.23 m3 zandkorrels

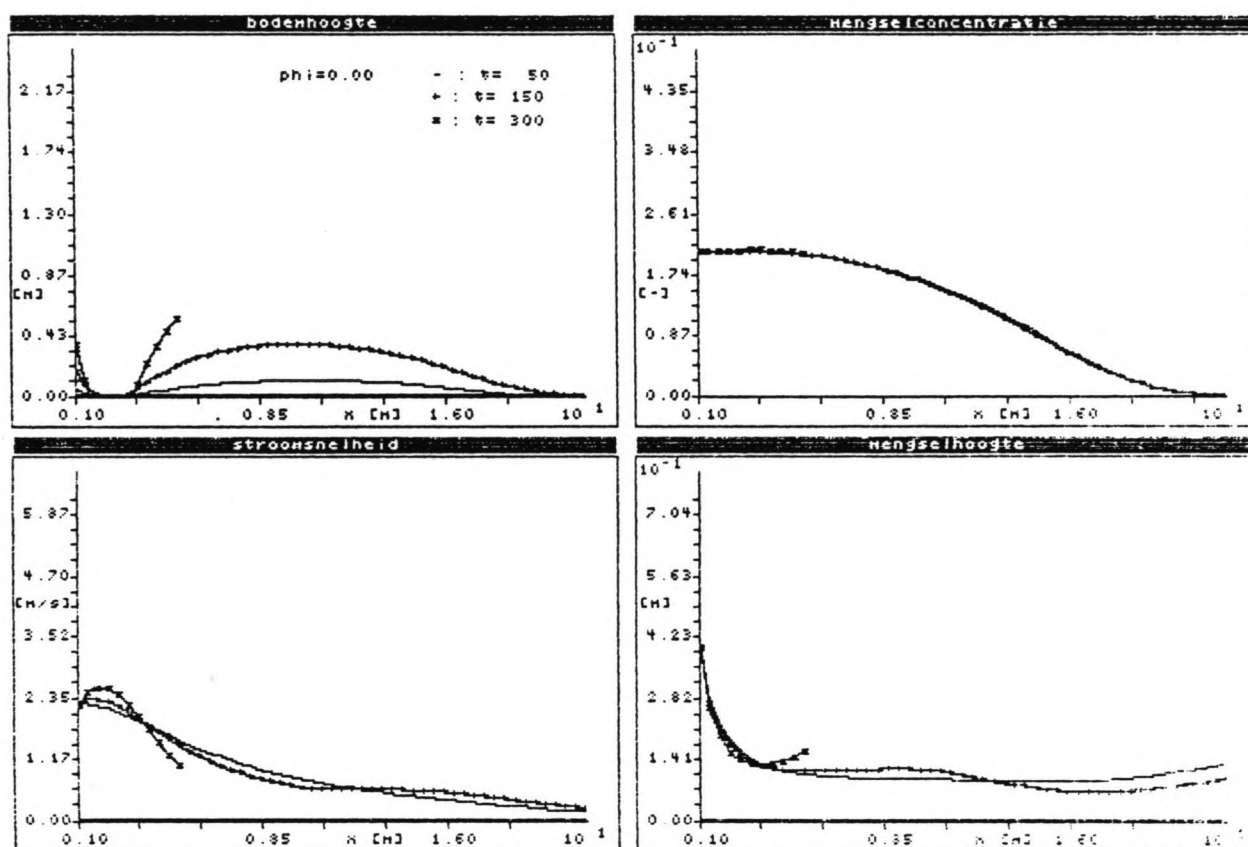
einde berekening

BIJLAGE 5E: SPUITEN VERTRAAGD, GEEN DWARSSTROOM

debiet= 5.73 m³/sec
 produktie= 2.01 m³ zand /sec
 straal schotel= 1.00 m
 buisdiameter= 0.900 m
 dwarssnelheid= 0.00 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 2.252 m/s beginhoogte= 0.405 m beginconc= 0.210
 dx= 0.02 m dt= 50.0 sec dphi=6.28

reailengte= 20 m bouwtijd= 300 sec



totale produktie= 601.65 m³ zand
 totale produktie= 360.99 m³ zandkorrels

totaal naar subkr stroming=159.33 m³ zandkorrels
 nogelijke opwerveling= 86.75 m³ zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=0.00E+00 m³ zandkorrels/m²
 capaciteit boven mengselstroming=1.26E-03 m³ zandkorrels/m²
 verliescapaciteit boven stroming= 0.00 m³ zandkorrels

totale verlies= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door opwerveling= 0.00 m³ zandkorrels

BIJLAGE 5F: SPUITEN VERTRAAGD, DWARSSTROOM = 0,6 M/S

debiet= 5.73 m³/sec
 produktie= 2.01 m³ zand /sec
 straal schotel= 1.00 m
 buisdiameter= 0.900 m
 dwarssnelheid= 0.60 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 2.252 m/s beginhoogte= 0.405 m beginconc= 0.210
 dx= 0.02 m dt= 50.0 sec dphi=0.52

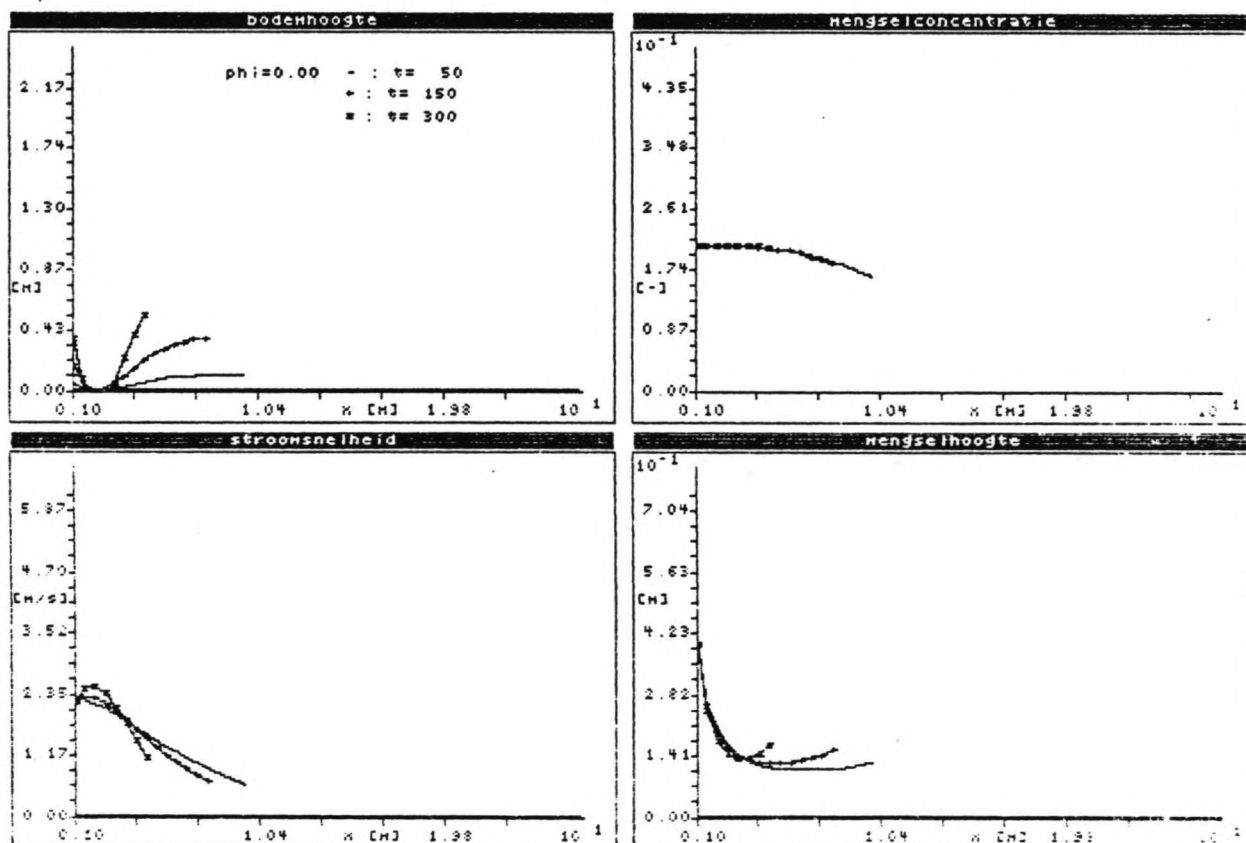
reailengte= 25 m bouwtijd= 300 sec

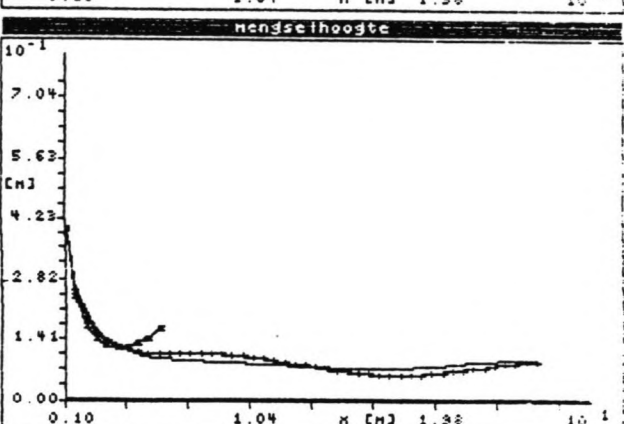
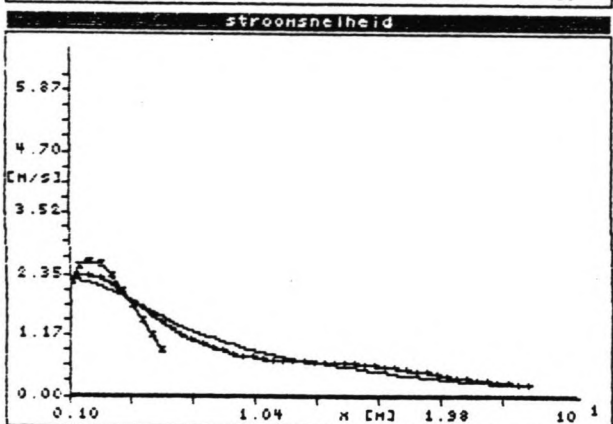
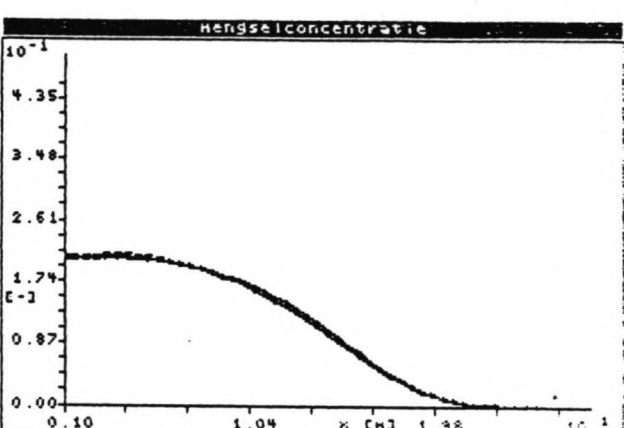
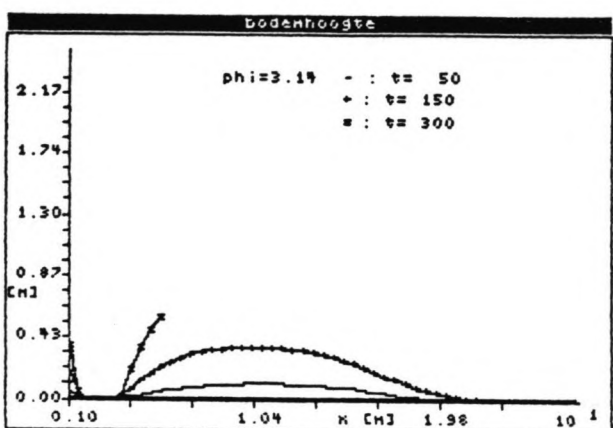
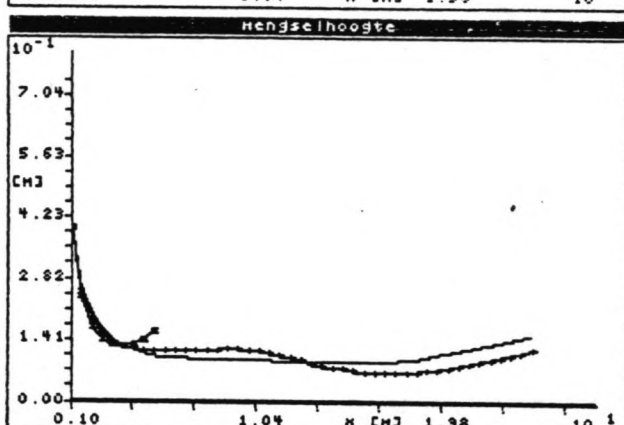
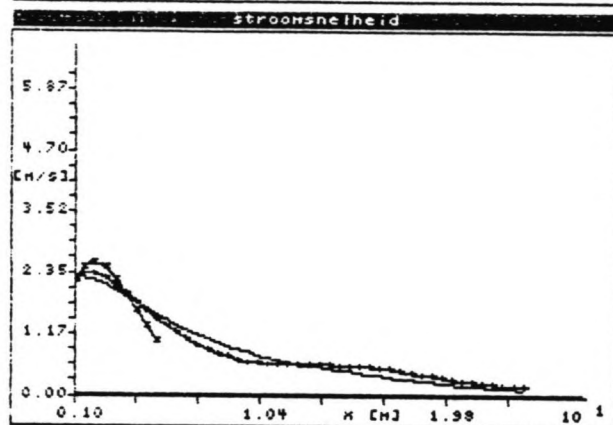
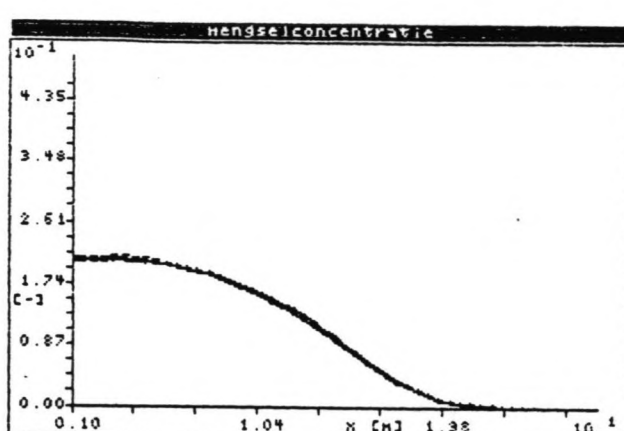
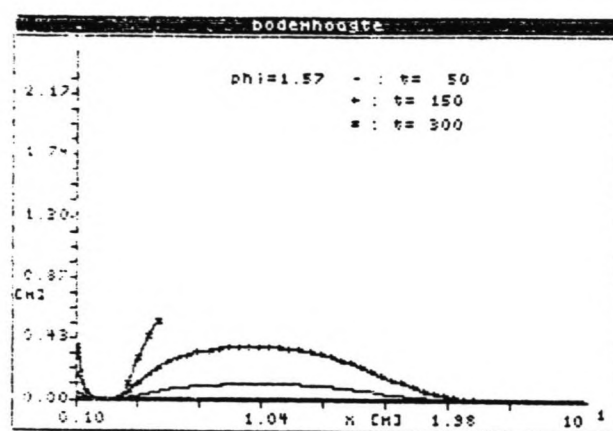
totale produktie= 601.65 m³ zand
 totale produktie= 360.99 m³ zandkorrels

totaal naar subkr stroming=133.57 m³ zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 85.33 m³ zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=1.87E-04 m³ zandkorrels/m²
 capaciteit boven mengselstroming=1.91E-02 m³ zandkorrels/m²
 verliescapaciteit boven stroming=100.67 m³ zandkorrels

totale verlies=100.67 m³ zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 66.59 m³ zandkorrels
 verlies door opwerveling= 34.08 m³ zandkorrels





BIJLAGE 5G: SPUITEN, KORTE DUUR

debiet= 5.73 m3/sec
 produktie= 1.62 m3 zand /sec
 straal krater= 7.20 m
 dwarsnelheid= 0.30 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.195 m beginconc= 0.170
 dx= 0.02 m dt= 50.0 sec dphi=0.52

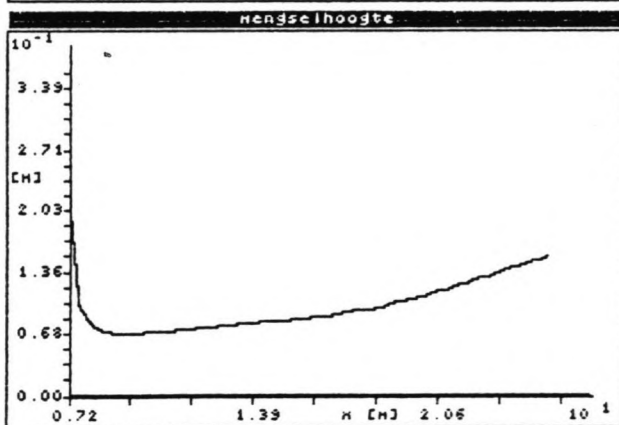
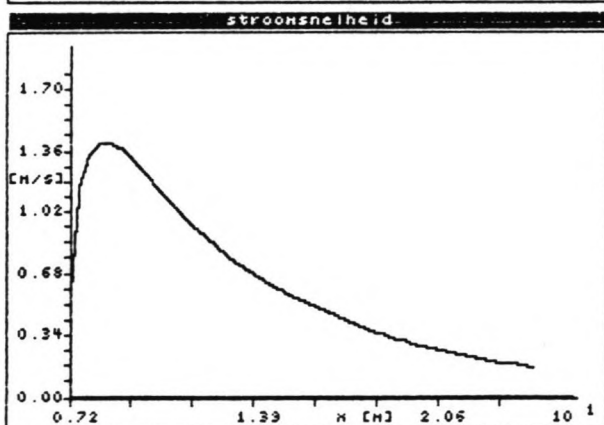
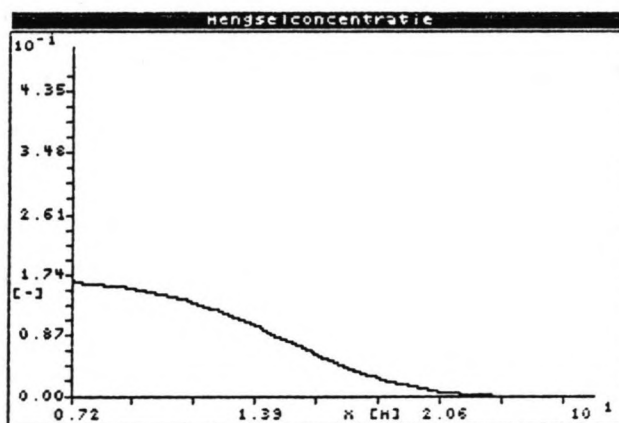
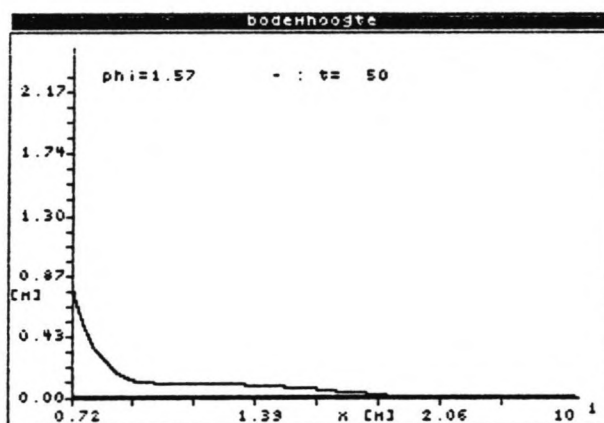
reeilengte= 18 m bouwtijd= 50 sec

totale produktie= 81.23 m3 zand
 totale produktie= 48.74 m3 zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 1.01 m3 zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 15.10 m3 zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag=1.17E-05 m3 zandkorrels/m2
 capaciteit boven mengselstroming=5.23E-03 m3 zandkorrels/m2
 verliescapaciteit boven stroming= 3.74 m3 zandkorrels

totale verlies= 3.74 m3 zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 1.01 m3 zandkorrels
 verlies door opwerveling= 2.73 m3 zandkorrels

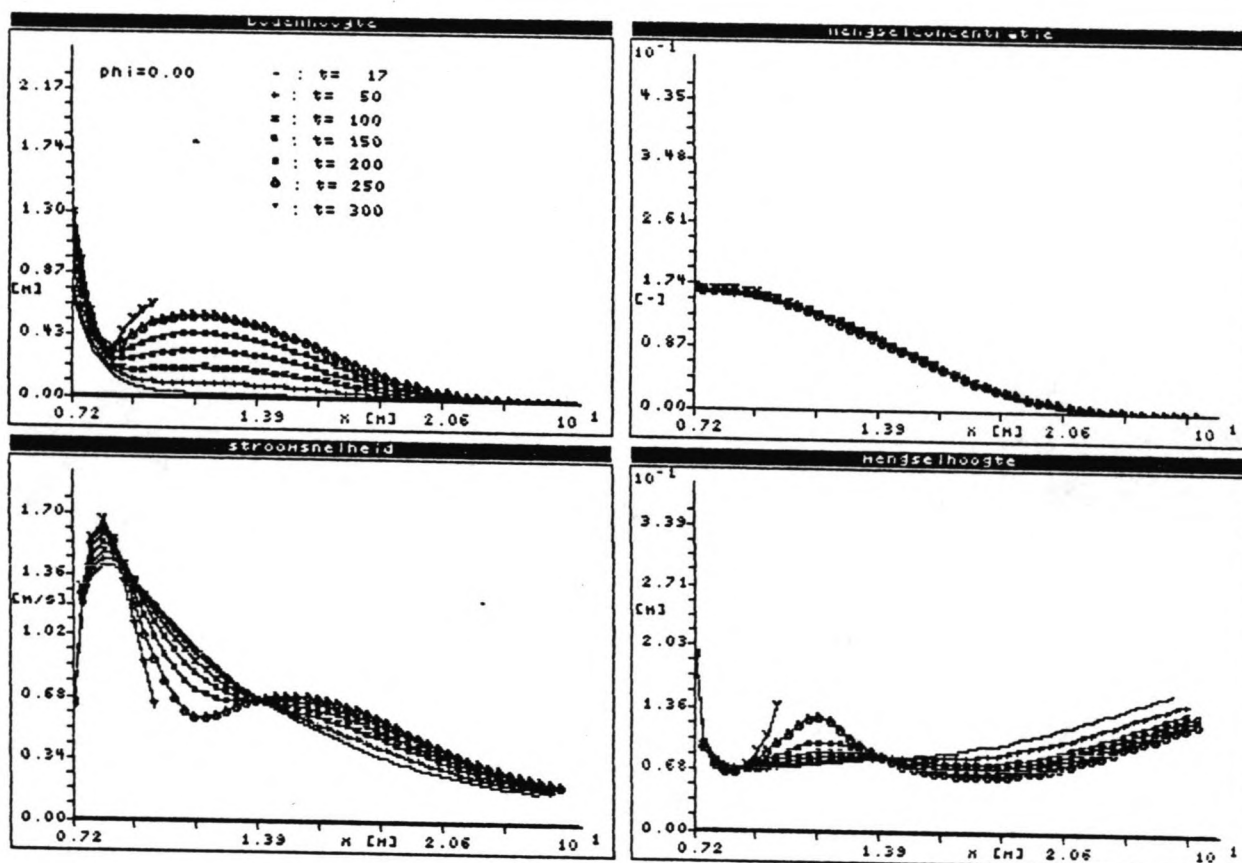


BIJLAGE 5H: SPUITEN, KORTERE TIJDSTAPPEN

debiet= 5.73 m³/sec
 produktie= 1.62 m³ zand /sec
 straal krater= 7.20 m
 dwarsnelheid= 0.00 m/s
 waterdiepte= 12.00 m
 d50= 185 μ

beginsnelh= 0.650 m/s beginhoogte= 0.195 m beginconc= 0.170
 dx= 0.02 m dt= 16.7 sec dphi=6.28

raailengte= 18 m bouwtijd= 300 sec



totale produktie= 487.39 m³ zand
 totale produktie= 292.44 m³ zandkorrels

totaal naar subkr stroming= 40.23 m³ zandkorrels
 mogelijke opwerveling= 80.65 m³ zandkorrels

capaciteit van ongestoorde bovenlaag= 0.00E+00 m³ zandkorrels/m²
 capaciteit boven mengselstroming= 1.02E-03 m³ zandkorrels/m²
 verliescapaciteit boven stroming= 0.00 m³ zandkorrels

totale verlies= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door subkr. stroming= 0.00 m³ zandkorrels
 verlies door opwerveling= 0.00 m³ zandkorrels

BIJLAGE 6: NADER ONDERZOEK

De laatste jaren zijn er een aantal modellen omtrent het storten van zand onder water ontwikkeld. Er blijkt een discrepantie te bestaan tussen de berekeningen en de - summier voorhanden - metingen; dit geldt ook voor het in dit rapport beschreven model.

Een eerste probleem is het veronderstelde optreden van een lagen model. Dit optreden zal d.m.v. metingen moeten worden geverifieerd. Voldoet het lagenmodel, dan moeten een aantal processen en stromingsparameters experimenteel nader bepaald worden. Dit geldt met name voor erosie, sedimentatie, opwerveling, verdunning en de wrijvingscoëfficiënten.

Een tweede probleem is de bepaling van het verlies. Voor een betere bepaling hiervan is nader theoretisch en experimenteel onderzoek nodig naar het opwervelingsproces is combinatie met de opnamecapaciteit van de dwarsstroom boven het mengsel.

Een derde belangrijk probleem is het gedrag van een zettingsvloeiing: wanneer treedt zo'n vloeiing op, welke eindhelling wordt bereikt en hoe groot is het gebied wat gaat vloeien.

Het beantwoorden van bovenstaande vragen zal nog veel werk vragen; op korte termijn zijn er wel twee projecten die nieuwe inzichten kunnen leveren:

- prototype metingen tijdens de sluiting van de Krammer (vooral probleem 1 en 3)
- laboratorium meting in de WL goot in 1987 (vooral probleem 1 en 2).

