

waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

Principe-onderzoek stratificatie in diepe putten

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M1663

december 1979

M1663

INHOUD

Lijst van symbolen

	blz.
<u>1 Inleiding</u>	1
<u>2 Probleemanalyse</u>	3
<u>3 Meetopstelling en proevenprogramma</u>	5
<u>4 Resultaten modelonderzoek en discussie</u>	7
4.1 Stromingsbeeld voor homogene omstandigheden	7
4.2 Stromingsbeeld voor gelaagde omstandigheden	7
4.3 Analyse van de resultaten	9
4.4 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/10$	11
4.5 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/7$	12
4.6 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/7$, trapjestalud	13
4.7 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/3$	14
4.8 Invloed van de taludhelling op de stabiliteit	15
<u>5 Interpretatie van de resultaten met betrekking tot prototype- omstandigheden</u>	17
<u>6 Samenvatting en konklusies</u>	18

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

Lijst van symbolen

Bezo	Bewegende Zoutopnemer	
C_1	konstante in entrainmentrelatie: $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$	-
F_i	intern Froudegetal: $F_1 = u_o / \sqrt{\epsilon g h_o}$	-
g	zwaartekrachtsversnelling	$[m/s^2]$
h_o	hoogte bovenlaag	$[cm]$
h_1	hoogte onderlaag	$[cm]$
NAP	referentieniveau waterspiegel bij stilstaand water	$[cm]$
Re	Reynoldsgetal	-
S_u	relatieve standaarddeviatie	-
t	tijd	$[s]$ of $[min]$
u_o	snelheid bovenlaag	$[cm/s]$
U_e	entrainmentsnelheid	$[cm/s]$
$\bar{U}_e$	gemiddelde entrainmentsnelheid	$[cm/s]$
x	koördinaat in lengterichting	$[cm]$
Z	grootheid aangevend de opname van zoet water in de onderlaag	$[cm]$
z	koördinaat in verticale richting	$[cm]$
α	hoek van taludhelling met horizontaal	$[^\circ]$
ϵ	relatieve dichtheid: $\epsilon = (\rho_1 - \rho_o) / \rho_o$	-
ν	kinematische viscositeit	$[m^2/s]$
ρ_o	dichtheid bovenlaag	$[kg/m^3]$
ρ_1	dichtheid onderlaag	$[kg/m^3]$
ρ_g	gemiddelde dichtheid: $\rho_g = \rho_o + (\rho_1 - \rho_o) / 2$	$[kg/m^3]$

Inleiding

Ten behoeve van de vele bouwactiviteiten in Nederland wordt op diverse plaatsen in het land zand gewonnen. Een potentieel rijk ontginningsgebied wordt aangetroffen op de bodem van het IJsselmeer. Ten gevolge van de bij zandwinning gebruikelijke produktieprocedure ontstaan lokaal putten met een diepte van ongeveer 30 m, wat vrij diep is in vergelijking tot de ongeveer 3 à 5 m diepte van het omringende IJsselmeer. In de zomer kan ten gevolge van opwarming van het IJsselmeerwater ter plaatse van deze diepe putten een thermische gelaagdheid ontstaan. Het is bekend dat een dergelijke gelaagdheid, ook bij kleine temperatuurverschillen zeer stabiel kan zijn.

De mate van stabiliteit zal mede bepaald worden door het karakter van de (veelal door wind veroorzaakte) stroming in de bovenlaag. Lokaal wordt dit karakter onder meer bepaald door de vorm van de baggerput, met name door de helling van het talud van de put; immers afhankelijk van deze helling zal de stroming aanliggen, c.q. loslaten op het talud. Loslating heeft neervorming tot gevolg, waardoor de stroming energie verliest en dus minder in staat is de onderlaag af te breken. Bovendien zijn de stroomsnelheden in de neer gering, zodat ook de entrainmentsnelheid ter plaatse gering zal zijn. Anderzijds bevordert neervorming de menging tussen onder- en bovenlaag en bestaat dus de mogelijkheid dat ten gevolge van het verhoogde turbulentieniveau ter plaatse van zo'n neer de gelaagdheid sneller afgebroken zal worden. Afhankelijk van de onderlinge grootte van de verschillende mechanismen zal de grootte van de taludhelling de stabiliteit van de gelaagdheid beïnvloeden. Doel van het onderzoek is, om uitgaande van het gegeven dat in een put in omringend ondiep water een (temperatuur-) gelaagdheid is ontstaan, te onderzoeken wat de invloed van de taludhelling van de put is op de stabiliteit van de gelaagdheid indien de stromende bovenlaag de (stagnante) onderlaag door entrainment en turbulente diffusie aantast.

In dit verslag wordt het principeonderzoek met bovenvernoemd doel gerapporteerd. In hoofdstuk 2 wordt de analyse van het probleem uiteengezet. Hier worden aan de hand van overwegingen met betrekking tot de in de stromingsleer geldende schaalregels de schalen voor geometrie en stromingsparameters bepaald. In hoofdstuk 3 wordt het model en de meetopstelling beschreven. Tevens wordt in dit hoofdstuk het proevenprogramma gegeven. In hoofdstuk 4 worden de resultaten gepresenteerd en besproken. Een en ander zal voorafgegaan worden door een kwalitatieve beschrijving van het stromingsbeeld. In hoofdstuk 5 tenslotte wordt uiteengezet hoe de resultaten met betrekking tot het prototype geïnterpreteerd

moeten worden.

Het onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van Distrikt Noord van de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging van Rijkswaterstaat en stond onder leiding van ir. J.C. Winterwerp, die ook dit verslag samenstelde.

2 Probleemanalyse

Het in dit verslag beschreven onderzoek is een principeonderzoek, dat wil zeggen dat de mechanismen die de stabiliteit van de gelaagdheid beïnvloeden onder zeer geschematiseerde omstandigheden onderzocht zullen worden. Dit blijkt uit de doelstelling van het onderzoek, zoals in de inleiding uiteengezet is. Er wordt uitgegaan van het gegeven dat in een put in omringend ondiep water een gelaagdheid is ontstaan die door diffusie en entrainment afgebroken wordt. Het hydraulisch model zal daarom op intern Froudegetal F_i geschaald moeten worden. Hierin is $F_i = u_o / \sqrt{\epsilon g h_o}$, met u_o is de snelheid in de bovenlaag, ϵ is het relatieve dichtheidsverschil ($\epsilon = (\rho_1 - \rho_o) / \rho_o$), g is de zwaartekrachtsversnelling en h_o is de dikte van de bovenlaag. De verschillende transportmechanismen in model en prototype hebben dan onderling relatief dezelfde grootte. In het prototype zal de vrije stroming in de bovenlaag turbulent zijn. In het hydraulisch model zal dit ook het geval moeten zijn. Het Reynoldsgetal Re zal daarom voldoende groot moeten zijn, met $Re = u_o h_o / \nu$, waarin ν de kinematische viscositeit van de bovenlaag is.

Bij dit onderzoek wordt de invloed bepaald van de taludhelling op de stabiliteit van de gelaagdheid. Het model dient dus niet samengetrokken te zijn. Zoals in de inleiding uiteengezet is, kan de grootte van de taludhelling de stabiliteit van de gelaagdheid beïnvloeden, doordat de grootte van de taludhelling het al dan niet aanliggen van de vrije stroming in de bovenlaag beïnvloedt. Bij de hier beschouwde Reynoldsgetallen zal de kritieke taludhelling α (d.w.z. de hoek waarbij de stroming net niet meer (geheel) aanligt) ongeveer $\text{tg} \alpha = 1/7$ bedragen. De stroming zal bij $\text{tg} \alpha = 1/10$ dus zeker aanliggen en bij $\text{tg} \alpha = 1/3$ dus zeker niet meer aanliggen. Een en ander resulteert in de modelmaten en stromingskarakteristieken zoals in tabel 1 weergegeven. De verschillende grootheden zijn gedefinieerd in figuur 1.

Een schatting van de snelheid van het afbraakproces van de gelaagdheid kan verkregen worden uit de entrainmentsnelheid U_e ter plaatse van de grenslaag. Volgens de literatuur (o.a. [5]) wordt gevonden voor U_e :

$$U_e = C_1 \frac{u_o^3}{\epsilon g h_o} \quad (2.1)$$

waarin $C_1 = O\{10^{-4}\}$. Met de grootheden volgens tabel 1 wordt dan $U_e = O\{10^{-6}\}$ m/s voor het model.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt dat in een gelaagde stroming het turbulent

transport door (de turbulente diffusie t.p.v.) de grenslaag sterk gedempt wordt. De literatuur [3] laat zien dat in stromingen zoals beschouwd in het onderhavige onderzoek, het turbulente transport verwaarloosbaar is ten opzichte van entrainment. Dit zal zowel in het prototype als in het model het geval zijn, omdat het hydraulisch model op intern Froudegetal geschaald is.

3 Meetopstelling en proevenprogramma

Het onderzoek is uitgevoerd in een lange, smalle goot (fig. 1), voorstellend een tweedimensionale doorsnede van de baggerput. De verticale wanden, de bodem en de taluds zijn in cement uitgevoerd. In het prototype worden, indien er eisen aan de grootte van de taludhelling gesteld worden, putten gebaggerd met een emmerbaggermolen, waardoor het talud "trapjesvormig" wordt. De hoogte van de trapjes zal ongeveer 2,5 m bedragen. De min of meer verticale zijde van de trapjes zullen afschuiven tot een "natuurlijke" helling van 1:3. De invloed van een dergelijk trapjestalud op de stabiliteit van de grenslaag is onderzocht voor de modelopstelling met taludhellingen met $\text{tg}\alpha = 1/7$. Het trapjestalud in het model is gerealiseerd met behulp van gestapelde aluminium plaatjes. Naden en kieren zijn met siliconekit afgewerkt. Een en ander is in figuur 1 met een schets verduidelijkt.

Het debiet van de stromende bovenlaag wordt met een pomp ingesteld. De watersnelheid u_0 wordt stroomopwaarts van de put gedefinieerd. Zij bedraagt voor alle proeven 9,8 cm/s binnen een marge van 2%.

De gelaagdheid als beginkonditie wordt verkregen door de goot eerst met zoet water te vullen en dan, bij stilstaand water, langzaam pekell te injecteren vanuit het diepste punt van de put. Aldus wordt een dikte van de grenslaag tussen pekellaag en zoete bovenlaag verkregen van ongeveer 1 cm. De put wordt op het oog gevuld tot de gewenste hoogte. Als referentieniveau wordt aangehouden het niveau van de waterspiegel bij stilstaand water. Dit referentieniveau is in dit verslag NAP genoemd.

De diffusie- en entrainmentmechanismen ter plaatse van de grenslaag bepalen de stabiliteit van de gelaagdheid. Het verloop van de concentratieverdeling rondom de grenslaag met de tijd is een maat voor de grootte van deze mechanismen. Deze concentratieverdeling wordt gemeten met drie zogenaamde Bewegende Zoutopnemers (Bezo), welke een verticale traverse door de grenslaag kunnen maken. De opstelling (in x-richting) van deze Bezo's is in figuur 1 en tabel 2 aangegeven en varieert met de ingestelde grenslaaghoogte. Op twee plaatsen stroomop- en stroomafwaarts van de put wordt de waterhoogte met een peilnaald gemeten. Een debietmeter meet het door de pomp geleverde debiet. De grootte van de entrainmentsnelheid is een functie van de snelheid in het algemeen en van de snelheidsverdeling in het bijzonder. Bij dit onderzoek is de snelheidsverdeling niet gemeten, omdat dit praktisch niet uitvoerbaar is: het model is klein (ondiep) en de snelheden zijn laag, zodat een mikromolen of een geïntegreerde snelheid geeft (die al bekend is door middel van debietmeter en

peilnaald) òf niet werkt omdat de snelheden te klein zijn (< 2 cm/s). Ook een pitotbuis is onbruikbaar, omdat het hier een model met dichtheidsstromingen betreft. Het stroombeeld kan wel kwalitatief bepaald worden met behulp van drijvertjes op het wateroppervlak, kleurstof en een hengel met een dun wollen draadje.

Zoals in hoofdstuk 2 uiteengezet is, wordt de stabiliteit van de gelaagdheid onderzocht, uitgaande van een zekere gelaagde begintoestand. Omdat het entrainmentproces bijzonder langzaam zal verlopen, is het niet realiseerbaar het afbraakproces te volgen tot een evenwichtstoestand bereikt is (bijv. een geheel zoete put). Daarom zullen, naast een serie proeven met pekels tot de rand van de put, experimenten uitgevoerd worden met pekels tot ongeveer halverwege de putrand als begintoestand. Deze overwegingen, tezamen met de eisen ten aanzien van taludhelling en -vorm, leiden tot het proevenprogramma zoals in tabel 2^{*}) is weergegeven.

^{*}) De hier niet genoemde argumentatie om de proeven 5 en 8 uit te voeren komt elders in dit verslag ter sprake.

4 Resultaten modelonderzoek en discussie

4.1 Stromingsbeeld voor homogene omstandigheden

De grootte van de taludhelling van de put is van invloed op het stromingsbeeld, in die zin dat zij voor homogene omstandigheden mede het al dan niet aanliggen van de stroming bepaalt. Dit is ook reeds in hoofdstuk 2 ter sprake gekomen. Kwalitatief is het stromingsbeeld bepaald met drijvertjes, kleurstof en een hengel met een wollen draadje. Voor de verschillende modelkonfiguraties is het resultaat in figuur 2 gepresenteerd. Er zij op gewezen dat het beeld kwalitatief is en dat de schetsen niet op schaal getekend zijn. Met name de hoogte van het gebied met terugstroming onder in de put (aangegeven met een "stroomscheidingslijn" in fig. 2) kan slechts zeer globaal bepaald worden vanwege de beperkte meetmethode en de zeer kleine snelheden ($< 1 \text{ cm/s}$) ter plaatse. Uit het stromingsonderzoek blijkt dat de in hoofdstuk 2 weergegeven verwachtingen ten aanzien van de grootte van de taludhelling α op het al dan niet loslaten van de stroming uitkomen. Bij $\text{tg}\alpha = 1/10$ ligt de stroming geheel aan, hoewel de snelheden nabij de bodem in het diepste deel van de put zo klein worden, dat zij nauwelijks meer waarneembaar zijn. De stroming blijkt over de gehele lengte een goed tweedimensionaal karakter te bezitten. Bij $\text{tg}\alpha = 1/7$ blijft de stroming de taludhelling volgen tot globaal 50 cm stroomafwaarts van de putrand. Vlak onder de stroomscheidingslijn is terugstroming waarneembaar, die snel kleiner wordt op grotere diepte. Het stromingsbeeld bij het trapjestalud is min of meer gelijk aan het laatstgenoemde; de stroming volgt de richting van de taludhelling globaal tot ongeveer 40 cm stroomafwaarts van de putrand. Zij laat dus iets eerder los dan bij een glad talud, wat te verwachten was. Tussen de trapjes in zijn kleine, lokale neertjes waarneembaar. Bij beide configuraties is de stroming redelijk tweedimensionaal over vrijwel de gehele lengte van de goot; slechts ter hoogte van de plaats waar loslating begint treedt enige dwarsstroming op. In de laatste configuratie met $\text{tg}\alpha = 1/3$ laat de stroming vanaf de putrand los. Met uitzondering van het gebied ter hoogte van de putrand, waar een geringe dwarsstroming aanwezig is, blijkt ook nu het karakter van de stroming tweedimensionaal.

4.2 Stromingsbeeld voor gelaagde omstandigheden

Tijdens het onderzoek werd bij de verschillende configuraties een drietal verschillende typen dichtheidsverdelingen waargenomen. Deze typen zijn met de

letters A, B en C aangeduid, in figuur 3 geschetst en hieronder omschreven. In alle gevallen blijkt de pekellaag onder de stromende bovenlaag stagnant te zijn.

Type A ontstaat in die configuraties waar, als beginkonditie, de put ongeveer tot de rand met pekkel is gevuld. De snelheidsverdeling is dan dusdanig dat in de bovenste paar cm van de pekellaag een circulatiestroming aanwezig is. Ten gevolge van deze circulatie wordt ter plaatse van het grensvlak zoet en zout water uitgewisseld. De onderkant van het grensvlak neemt een, aanvankelijk met de tijd toenemende hoeveelheid zoet water op, in figuur 3 aangeduid met het gearceerde oppervlak Z. Er ontstaat dus een drielagensysteem. Dit fenomeen is geen resultaat van het grote dichtheidsverschil toegepast bij het huidige onderzoek: er is één meting uitgevoerd met een dichtheidsverschil $\Delta\rho = 19 \text{ kg/m}^3$ (zie 4.5, proef 5), waarbij een zelfde soort dichtheidsverdeling ontstond. Bovendien wordt een soortgelijk drielagensysteem ook aangetroffen in [1] en [2], waar de invloed van wind, respektievelijk selektief afzuigen op de dichtheidsverdeling is onderzocht bij een dichtheidsverschil van orde 20 kg/m^3 . Er wordt in deze publikaties echter niet dieper op dit fenomeen ingegaan. Naast de opname van zoet water in het onderste deel van het grensvlak is ook entrainment waar te nemen: het hele grensvlak zakt gestaag.

Type B ontstaat als de put als beginkonditie tot ongeveer driekwart tot halverwege met pekkel gevuld wordt. Ter hoogte van de bovenkant van de pekellaag is dan een kleine terugstroming waarneembaar. Het grensvlak zakt langzaam ten gevolge van entrainment. De snelheid ter plaatse is echter zo laag dat het uit de onderlaag afgekalfde zout niet (snel genoeg) door het zoete water afgevoerd kan worden, zodat langzaam een zoute "buffer" in het onderste gedeelte van de zoete bovenlaag ontstaat.

Type C ontstaat tenslotte als de put tot ongeveer halverwege met pekkel gevuld wordt als beginvoorwaarde. De snelheden ter plaatse van het grensvlak zijn dan zo klein dat er vrijwel niets meer gebeurt: het grensvlak zakt bijzonder langzaam.

In figuur 3 is de helling, aangevend de dichtheidsgradient dp/dz voor de verschillende typen A, B en C opzettelijk ongeveer gelijk getekend. Het blijkt dat deze gradient gedurende het verloop van de metingen vrijwel niet verandert. De drie waargenomen typen stromingen zijn het resultaat van verschillende proeven met ieder hun eigen specifieke beginkondities. Deze beginkondities

behoeven niet noodzakelijkerwijze situaties te zijn die bij een natuurlijk, kontinu afkalvingsproces opeenvolgend optreden. De vraag is dus gewettigd of deze typen relevant zijn voor prototypeomstandigheden. Uit praktische overwegingen (processen met zeer grote tijdschaal) is het niet mogelijk ter verifikatie een dergelijk continu afkalvingsproces in het model te simuleren. Een belangrijke overweging is echter dat type A alleen kan ontstaan indien er een verticale circulatiestroming optreedt. Het is niet zeker dat de meer driedimensionale circulatiestroming zoals die in het prototype op zal treden, een identiek drielagensysteem zal veroorzaken. De karakteristieken van type A zullen desondanks wel geanalyseerd worden, omdat verwacht kan worden dat de ontwikkeling van het drielagensysteem van invloed kan zijn op de stabiliteit van de gelaagdheid. Helaas blijkt deze ontwikkeling voor de verschillende proeven nogal te verschillen, zodat onderlinge vergelijking moeilijk wordt. Ook blijkt bij geen der proeven een evenwichtssituatie bereikt te worden, in die zin dat het drielagensysteem zich niet verder ontwikkelt. Het is niet bekend of de ontwikkeling van het drielagensysteem de grootte van U_e zal beïnvloeden; aangenomen wordt echter dat de invloed van de taludhelling op U_e kwalitatief niet beïnvloed wordt, zodat de resultaten van het modelonderzoek representatief voor het prototype blijven.

Type A en C daarentegen zullen waarschijnlijk wel in het prototype optreden. Type C zal dan gevonden worden bij zeer lage stromingssnelheden, zoals bijvoorbeeld ter plaatse van een neer optreden.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt dat het voor stroming noodzakelijke drukverval verkregen wordt door een zogenaamd intern verhang. Het blijkt dat voor alle proeven het verhang van het vrije wateroppervlak nihil is ($\sim 3 \times 10^{-4}$). Bij de proeven met de put tot de rand gevuld met pek (proeven 1, 3, 6 en 9) blijkt het verhang van de onderlaag orde 4×10^{-3} te zijn. Bij de andere proeven is het intern verhang te klein om te meten. De waterspiegel zelf blijkt, ter plaatse van de twee peilnaalden tot 12 mm boven NAP te stijgen bij een stroomsnelheid $u_o = 9,8$ cm/s.

4.3 Analyse van de resultaten

Bepaling van de entrainmentsnelheid

De positie h_o van de grenslaag is gedefinieerd als de positie van het vlak waar de dichtheid ρ_g van het water juist tussen die van pek en zoet water inligt ($\rho_g = \rho_o + \Delta\rho/2$). De entrainmentsnelheid is dan gedefinieerd als de snel-

heid waarmee dit grensvlak zakt.

De entrainmentsnelheid U_e zal in de loop van de tijd afnemen; immers ten gevolge van entrainment zakt het grensvlak, waardoor h_o toe- en u_o afneemt: $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$. Omdat U_e klein is, zijn du_o/dt en dh/dt klein, zodat ook dU_e/dt klein zal zijn. Daarom is de fout klein indien U_e per proef konstant genomen wordt. Hiernaar gaat de voorkeur uit omdat dan de entrainmentsnelheid, dus de stabiliteit van de gelaagdheid, voor de verschillende proeven onderling beter te vergelijken is.

De entrainmentsnelheid U_e is gedefinieerd als de helling van de rechte door de verzameling van alle gemeten grensvlakposities als functie van de tijd, bepaald met de kleinste kwadratenmethode. Zoals uiteengezet, neemt U_e af met de tijd. Het blijkt echter niet mogelijk deze afname dU_e/dt eenduidig uit de metingen te distilleren ten gevolge van de nauwkeurigheid van die metingen. Hierop zal dan ook niet verder worden ingegaan.

Bepaling van de relatieve standaarddeviatie

De nauwkeurigheid van de aldus gevonden U_e wordt aangegeven door de relatieve standaarddeviatie S_u van U_e . Deze is als volgt bepaald: U_e is gedefinieerd als $U_e = dh/dt$. Dus bij benadering geldt:

$$S_u / \bar{U}_e \approx S_{\Delta h} / \bar{\Delta h} + S_{\Delta t} / \bar{\Delta t} \approx S_{\Delta h} / \bar{\Delta h}$$

Hierin is $S_{\Delta h}$ de standaarddeviatie van de gemeten grenslaagzakking, $S_{\Delta t}$ de standaarddeviatie in de tijd ($= 0$) en geeft — een over het tijdsinterval gemiddelde waarde weer.

Onderlinge vergelijking van de resultaten

Zoals in het voorgaande beschreven is $dU_e/dt \neq 0$ en $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$. De over een proef gemiddelde waarde van U_e is dus afhankelijk van de beginkondities (met name h_o en dus u_o) en de tijdsduur van de proef. De put in de goot is op het oog tot een bepaalde hoogte gevuld, waardoor de beginkondities voor de verschillende proeven niet exact gelijk zijn (zie tabel 2, kolom 3). Bovendien liep de tijdsduur van de verschillende proeven wat uiteen (4-6 uur). Om de proeven 1, 3, 6 en 9 onderling toch te kunnen vergelijken is van deze proeven slechts een gedeelte van de metingen geanalyseerd en wel dat deel van de metingen, verricht in een tijdsbestek van vier uur beginnend vanaf het moment waarop het grensvlak ter plaatse van Bezo 2 is gezakt tot op 5,2 cm onder NAP. Bij de proeven 1, 4 en 7 is het verschil in beginkonditie relatief verwaar-

loosbaar en is dU_e/dt zo klein, dat zij niet uit de metingen te distilleren is. Daarom zijn deze proeven onderling direkt te vergelijken.

Bepaling van Z

De grootheid Z (fig. 1) is een maat voor de ontwikkeling van het drielagen-systeem bij het type A-stroming. Z is gedefinieerd als de met de pekeldichtheid genormaliseerde hoeveelheid zout die per oppervlakte-eenheid uit de onderlaag met een gelijke hoeveelheid zoet water wordt uitgewisseld. Z is direkt uit de registraties bepaald en is gelijk aan het produkt van de hoogte van Z (fig. 3) en de gemiddelde relatieve dichtheid van het gearceerde gebied in figuur 3: $(\rho_p - \rho)/(\rho_p - \rho_o)$, met ρ_p is de dichtheid van pekels, ρ_o is de dichtheid van zoet water en ρ is de gemiddelde dichtheid van Z. Z wordt dus uitgedrukt in cm. Definitie en bepaling van Z zijn subjektief, zodat geen al te grote waarde aan de grootte van Z toegekend moet worden.

4.4 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/10$

In de modelkonfiguratie met taludhelling 1/10 zijn 2 proeven uitgevoerd. Bij proef 1 is de put tot de rand toe gevuld met pekels, bij proef 2 tot ongeveer halverwege. De resultaten zijn gepresenteerd in de tabellen 2 en 3 en figuur 4. De stroming bij proef 1 is van het type A. Uit tabel 3 blijkt dat bij deze proef de entrainmentsnelheid U_e zoals bepaald met de Bezo's 1, 2 en 3 ongeveer $1,1 \times 10^{-4}$ cm/s bedraagt. Dit geeft een waarde van de konstante $C_1 = 1,0 \times 10^{-4}$ uit $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$, hetgeen goed overeenkomt met de in de literatuur gevonden waarden. De relatieve standaarddeviatie S_u is kleiner dan 5%. Bij proef 1 is uit de metingen geen duidelijke afname van U_e met de tijd waar te nemen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5, waar blijkt dat de meetpunten vrij willekeurig (random) om de met de kleinste kwadratenmethode bepaalde rechte liggen. Ook bij de niet gepresenteerde resultaten van Bezo 1 en 3 is dit het geval. Het is niet duidelijk waarom de metingen deze afname in U_e niet vertonen. Uit figuur 4 blijkt dat Z aanvankelijk met de tijd toeneemt, doch na verloop van tijd neigt naar een konstante waarde, die echter in het tijdsbestek waarin proef 1 is uitgevoerd niet bereikt wordt. De toename van Z blijkt stroomafwaarts toe te nemen. Dit kan verklaard worden uit het intern verhang, dat tot gevolg heeft dat de snelheid in de bovenlaag stroomafwaarts toeneemt en daarmee de verticale circulatie.

Verder blijken de lijnen a, b en c in figuur 4 voor de drie Bezo's min of meer evenwijdig te lopen, wat in overeenstemming is met de resultaten van tabel 3.

Dat de lijnen a, b en c ook onderling ongeveer evenwijdig lopen is een indicatie dat de dichtheidsgradiënt in het grensvlak gedurende de proef gelijk blijft, dat wil zeggen het grensvlak blijft globaal een konstante dikte behouden.

De stroming bij proef 2 is van het type B. De entrainmentsnelheid bij proef 2 is ongeveer $0,18 \times 10^{-4}$ cm/s, hetgeen overeenkomt met $C_1 = 1,9 \times 10^{-2}$. De konstante C_1 is hier dus 2 orden groter dan bij proef 1. Echter de kondities bij proef 2 liggen buiten het ijkgebied (kleine snelheden, schuifspanning ter plaatse van het grensvlak) waarvoor de relatie (2.1) is opgesteld. Er moet dus niet te veel waarde aan de (schijnbare) grootte van C_1 gehecht worden. Wel significant is de grootte van de standaarddeviatie S_u , die hier groter is dan bij proef 1. Dit wordt veroorzaakt doordat de verstoringen en afleesnauwkeurigheid van de Bezo-registraties, voor proef 1 en 2 gelijk, relatief belangrijker zijn bij proef 2, vanwege de kleine waarde van de entrainmentsnelheid. Het is niet duidelijk waarom bij Bezo 1 S_u zoveel groter is dan bij Bezo 2 en 3.

4.5 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/7$

In de konfiguratie met taludhelling $1/7$ zijn de proeven 3, 4 en 5 uitgevoerd, respectievelijk proeven met als beginkonditie pekels tot de putrand en tot halverwege de putrand en een proef met zout water tot de putrand (zie tabel 2). De resultaten van proef 3 (type A) zijn in figuur 6 en tabel 3 gepresenteerd. Het betreft hier een proef van lange tijdsduur (ongeveer 6,5 uur), wat geïllustreerd wordt in figuur 5. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat U_e afneemt met de tijd, met name gedurende de eerste 30 minuten is deze afname groot, wat veroorzaakt wordt doordat de put tot erg grote hoogte gevuld was^{*)}. Indien een deel van de metingen geanalyseerd wordt (zie hfdst. 4.3 en 4.8) is de afname van U_e met t veel minder geprononceerd (vergelijk de driehoekjes met de streeplijn). Uit tabel 3 blijkt dat U_e voor de drie Bezo's vrijwel gelijk is. Figuur 6 laat zien dat de dichtheidsgradiënt weer min of meer konstant blijft. De afwijking in helling van de lijnen c is het gevolg van de moeizame definitie van het punt c bij deze proef (zie fig. 6). Uit de registraties van de metingen blijkt echter duidelijk dat de grenslaag konstant in dikte blijft, zodat de dichtheidsgradiënt konstant blijft. Tenslotte laat figuur 6 het verloop van Z met t zien. Weer blijkt dat Z en de toename van Z stroomafwaarts groter is dan stroomopwaarts.

^{*)} De put was in feite tot iets over de rand gevuld. Zoals mede uit figuur 5 blijkt, is na verloop van tijd toch weer een met andere proeven vergelijkbare situatie ontstaan.

Het ontstaan van een drielagensysteem en de toename van Z met de tijd is een zeer markant resultaat van dit onderzoek. De vraag rijst of dit inherent aan de stroming in een dergelijke configuratie is, of dat dit veroorzaakt wordt door het grote dichtheidsverschil toegepast in het onderhavige onderzoek. Daarom is een additionele proef uitgevoerd met een kleiner dichtheidsverschil: $\Delta\rho = 19 \text{ kg/m}^2$ (proef 5, tabel 2). Uit figuur 7 blijkt dat er inderdaad weer een drielagensysteem ontstaat, echter de toename van Z met t is nu veel groter dan bij proef 3 (vergelijk fig. 6 en 7). Ook U_e blijkt groter te zijn. Deze proef is niet verder uitgewerkt, daar zij geen extra informatie oplevert ten aanzien van de vraagstelling zoals omschreven in de doelstelling van het onderzoek.

De resultaten van proef 4 (type B) tenslotte zijn in tabel 3 weergegeven. De gemiddelde entrainmentsnelheid bedraagt ongeveer $0,11 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$: ter plaatse van Bezo 2 en 3 is $U_e = 0,08 \times 10^{-4}$, ter plaatse van Bezo 1 $U_e = 0,15 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Het is denkbaar dat nabij Bezo 1 de entrainmentsnelheid wordt vergroot ten gevolge van een hogere turbulentie-intensiteit in de bovenstroming ter plaatse, veroorzaakt door het loslaten van de bovenlaag (zie hfdst. 4.1). Deze extra turbulentie zou dan stroomafwaarts uitdempen. Deze verklaring wordt gestaafd door de hogere waarden van S_u ter plaatse van Bezo 1, doch tegengesproken door het resultaat van proef 7, dat in het volgende hoofdstuk ter sprake komt.

4.6 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/7$, trapjestalud

De metingen, waarvan de resultaten in dit hoofdstuk beschreven worden, zijn aan het oorspronkelijke meetprogramma toegevoegd om een indruk te krijgen wat de invloed van een meer natuurlijke taludvorm (trapsgewijs, zie ook hfdst. 3) op de stroming is. Het overall beeld van de homogene stroming is globaal hetzelfde als die bij een glad talud; de stroming langs een glad talud blijft iets langer aanliggen dan bij het trapjestalud (zie ook 4.1). Bovendien zijn bij het trapjestalud tussen de trapjes neertjes aanwezig. Daarom mag verwacht worden dat de turbulentie-intensiteit van de stroming in de configuratie met trapjestalud wat hoger is dan bij een glad talud. In deze configuratie zijn de proeven 6, 7 en 8 uitgevoerd (tabel 2). De resultaten van proef 6 zijn in tabel 3 en figuur 8 gepresenteerd. De stroming is van het type A. De entrainmentsnelheid is voor alle Bezo's ongeveer gelijk (tabel 3) en bedraagt $U_e = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Ook hier blijkt U_e een weinig af te nemen met t . Uit figuur 8 blijkt weer dat de dichtheidsgradiënt globaal konstant blijft (lijnen a en b). De lijnen c hebben een iets andere helling, weer veroorzaakt door de

moeizame definitie van punt c. Merkwaardigerwijze is het absolute niveau van Z, vooral tijdens het eerste uur erg hoog, wat zeker niet alleen aan de slechte definieerbaarheid van Z kan worden geweten. De toename van Z met t daarentegen is weer vergelijkbaar met die van andere proeven.

In een poging iets meer te weten te komen over het verloop van het afkalvingsproces over langere periode, dus over de fase liggend tussen de configuratie met volledige gevulde en half gevulde put, is proef 8 uitgevoerd. De put is hier tot ongeveer 6/7 gevuld met pekels als beginconditie. Interessant is dat nu 2 typen stromingen manifest worden: type A nabij Bezo 1 en 2 en type B bij Bezo 3. Een mogelijke verklaring is dat bij deze stromingsomstandigheden type B zou moeten optreden, doch dat ten gevolge van het (stroomafwaarts afnemende) verhoogde turbulentieniveau, afkomstig van de neren tussen de trapjes in, type A optreedt. Uit figuur 9 blijkt dat Z na ongeveer 2 uur stromen konstant wordt. De entrainmentsnelheid U_e is bij Bezo 1 lager dan stroomafwaarts en bedraagt gemiddeld ongeveer $0,4 \times 10^{-4}$ cm/s (tabel 3). De in figuur 9 gesuggereerde stijging van het grensvlak (stijging van de lijnen a) wordt veroorzaakt door de slechte definitie van punt a en treedt in werkelijkheid niet op. De stroming bij proef 7 vertoont twee typen: bij Bezo 1 en 2 type B, bij Bezo 3 type C. Ook dit kan weer veroorzaakt worden door een afname in turbulentie-intensiteit. De entrainmentsnelheid ter plaatse van Bezo 1 is onverklaarbaar laag, stroomafwaarts is U_e weer groter. Ook S_u is bij Bezo 1 erg groot, reden waarom de resultaten hier gewantrouwd moeten worden.

De proeven 6, 7 en 8 simuleren 3 stadia in het afkalvingsproces van de ge-laagdheid. De afname van de absolute grootte van U_e met de zakking van de grenslaag is in tabel 3 gepresenteerd. In termen van C_1 (2.1) levert dit echter voor de proeven 6, 7 en 8 op respectievelijk $C_1 = 1,9 \times 10^{-4}$; 9×10^{-4} en 105×10^{-4} . Dit resultaat illustreert nog eens dat de relatie (2.1) zeer omzichtig gebruikt dient te worden en zeker niet voor extrapolatie geschikt is.

4.7 Resultaten voor $\text{tg}\alpha = 1/3$

In de configuratie met taludhelling 1/3 zijn de proeven 9 en 10 uitgevoerd. Bij proef 9 is de put ongeveer tot de rand gevuld met pekels. De stroming is van het type A. De resultaten zijn gepresenteerd in de tabellen 2 en 3 en figuur 10. De gemiddelde entrainmentsnelheid U_e bedraagt $1,4 \times 10^{-4}$ cm/s en is voor alle drie Bezo's min of meer gelijk. De registratie van de metingen laten zien dat U_e een weinig kleiner wordt met toenemende t. Uit figuur 10

blijkt dat de lijnen a, b en c weer ongeveer evenwijdig lopen, hetgeen impliceert dat de verticale dichtheidsgradiënt konstant blijft, een resultaat dat ook uit de registraties van de metingen volgt. Figuur 10 laat tevens een flauwe toename van Z zien, een toename die stroomafwaarts weer het grootst is.

De beginkondities bij proef 10 wijken af van die van de proeven 2, 4 en 7: de put is tot ongeveer 2/3 hoogte gevuld. Verwacht moet worden dat hierdoor de snelheid in de bovenlaag groter is dan bij de proeven 2, 4 en 7 en daarmee de entrainmentsnelheid. Dit wordt bevestigd door de resultaten gepresenteerd in tabel 3. De entrainmentsnelheid ter plaatse van de drie Bezo's is ongeveer gelijk en bedraagt $0,15 \times 10^{-4}$ cm/s. Een idee van de orde van grootte van de entrainmentsnelheid voor het geval dat de put ongeveer even ver met pekel gevuld zou zijn als bij de proeven 2, 4 en 7 kan verkregen worden met de relatie (2.1). Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven varieert C_1 met h_o . Het zal dus slechts mogelijk zijn de onder- en bovengrens van U_e met behulp van (2.1) te bepalen. Hiertoe dient een onder- en bovengrens voor C_1 gevonden te worden. Uit de resultaten van proef 10 blijkt $C_1 = 0,4 \times 10^{-2}$; een gemiddelde van de proeven 2, 4 en 7 geeft $C_1 = 1,3 \times 10^{-2}$. Hieruit volgt dus dat, indien de put met $\text{tg} \alpha = 1/3$ als beginkonditie tot 27 cm onder NAP met pekel gevuld zou zijn geweest, de resulterende entrainment U_e zou liggen tussen $U_e = 0,04 \times 10^{-4}$ en $0,13 \times 10^{-4}$ cm/s. Uiteraard dient de stroming kwalitatief bij deze extrapolatie niet te veranderen. Dat dit het geval is, wordt bevestigd in hoofdstuk 4.1.

4.8 Invloed van de taludhelling op de stabiliteit

De invloed van de taludhelling op de stabiliteit van de gelaagdheid wordt verkregen door onderlinge vergelijking van de resultaten zoals gepresenteerd in de voorgaande hoofdstukken. Gezien de aard van deze resultaten is het zinvol onderscheid te maken tussen de resultaten in configuraties met volle en halfvolle putten. Vanwege de slechte definieerbaarheid van Z zal deze grootte in de onderlinge vergelijking van de resultaten niet beschouwd worden. Tenslotte moet er op gewezen worden dat de vergelijkingen gebaseerd zijn op de resultaten van drie, toch vrij willekeurig opgestelde Bezo's en dat de konklusies gebaseerd zijn op het rekenkundig gemiddelde van deze resultaten. Het is duidelijk, dat zeker in die gevallen waar loslating optreedt, het rekenkundig gemiddelde van de resultaten niet noodzakelijkerwijze een korrekte waarde voor de totale entrainment oplevert. Dit zal vooral het geval zijn bij de proeven 2, 4, 7 en 10 (zie ook hfdst. 4.1), hetgeen ook gesuggereerd wordt door de resultaten gepresenteerd in tabel 3: per proef verschilt U_e voor de verschillende Bezo's aanzienlijk.

Vergelijking van de resultaten van de proeven 1, 3, 6 en 9, zoals gepresenteerd in de laatste 4 kolommen van tabel 3, laat zien dat $\bar{U}_e$ de entrainment-snelheden ter plaatse van de 3 Bezo's $\bar{U}_e$ en de gemiddelde entrainmentsnelheden $\bar{U}_e$ elkaar niet veel ontlopen; $\bar{U}_e$ is ongeveer $\bar{U}_e = 10^{-4}$ cm/s. Toch is er een systematische, zij het geringe, toename in U_e bij toenemende taludhelling. Dit kan verklaard worden uit de overweging dat bij proef 6 ($\text{tg}\alpha = 1/7$, trapjes-talud) en proef 9 ($\text{tg}\alpha = 1/3$) de turbulentie-intensiteit in de bovenstroming ten gevolge van (lokale) loslating bij de putrand hoger is dan bij de proeven 1 en 3.

Vergelijking van de resultaten van de proeven 2, 4, 7 en 10 (zie laatste 4 kolommen tabel 3) wordt bemoeilijkt door de inkonsistentie van de resultaten per Bezo voor de verschillende proeven en de nauwkeurigheid van de resultaten. Globaal blijkt dat in configuraties met een half met pekkel gevulde put als beginkonditie de entrainmentsnelheid de orde van grootte heeft $U_e = 10^{-5}$ cm/s. Toch lijkt, rekening houdend met de nauwkeurigheid, $\bar{U}_e$ af te nemen met toenemende taludhelling. Dit wordt dan veroorzaakt door loslating van de hoofdstroming, die ten gevolge hiervan energie verliest en de zoute onderlaag met een langzaam stromende zoete neer afdekt.

Samenvattend kan gekonkludeerd worden dat een steil talud, ten gevolge van een relatief hoog turbulentieniveau, in eerste instantie een iets hogere entrainmentsnelheid en daarmee dus een kleinere stabiliteit van de gelaagdheid tot gevolg heeft dan een flauw talud.

Na verloop van tijd zal het destabiliserende effect van hogere turbulentie-intensiteit minder geprononceerd worden en lijkt geheel verdwenen te zijn als de put tot halverwege met pekkel gevuld is. In dat geval suggereren de resultaten zelfs dat het effect van de taludhelling op de stabiliteit van de gelaagdheid tegenovergesteld wordt. Dit zou dan veroorzaakt worden door de vorming van neren, die het entrainmentproces afremmen.

5 Interpretatie van de resultaten met betrekking tot prototypeomstandigheden

Het onderzoek is uitgevoerd in een model dat een tweedimensionaal karakter heeft, in tegenstelling tot het prototype waar de stroming een driedimensionaal karakter heeft. Echter de breedte-diepteverhouding (doorsnede gat ten opzichte van diepte bovenlaag) is ongeveer tweehonderd, wat zodanig groot is dat verwacht mag worden dat het hydraulisch tweedimensionaal model relevante resultaten oplevert met betrekking tot het prototype. Wandeffekten in het model worden klein verondersteld en niet bij de interpretatie meegenomen.

De schalen van het hydraulisch model zijn dusdanig gekozen dat het intern Froudegetal F_1 voor model en prototype ongeveer gelijk zijn (tabel 1: het verschil in F_1 is klein en beïnvloedt de interpretatie niet). Dit houdt in dat het entrainmentproces in het model op schaal wordt gereproduceerd, met andere woorden de konstante C_1 in (2.1) is voor model en prototype ongeveer even groot. Wel is in het model het Reynoldsgetal, hoewel hoog genoeg om turbulente stroming te garanderen, aanzienlijk kleiner dan in het prototype (tabel 1). Dit heeft reperkussies voor de grootte van de schuifspanning ter plaatse van het grensvlak: de schuifspanning neemt immers toe bij afnemend Reynoldsgetal. Echter de "entrainmentrate" (entrainmentsnelheid U_e /schuifspanningssnelheid U_*) verandert weinig met Re [3]. De schuifspanningssnelheid zelf is evenredig met Re^{-6} à Re^{-10} [4], waaruit dus gekonkludeerd kan worden dat U_e een zwakke functie van Re zal zijn in het hier relevante Reynoldsbereik. Resumerend kan gekonkludeerd worden dat, bij beginkondities zoals aangetroffen bij de proeven 1, 3, 6 en 9, dat wil zeggen met de onderlaag tot ongeveer de rand van de put, de entrainmentsnelheid in het prototype ongeveer 10^{-6} à 10^{-5} m/s zal bedragen. Met het zakken van de onderlaag zal U_e afnemen, echter minder dan op grond van (2.1) verwacht mag worden. Het onderzoek leert verder dat de entrainmentsnelheid niet veel door de taludhelling van de put beïnvloed wordt, hoewel er aanvankelijk wel degelijk een kleine systematische toename van U_e te verwachten is met toenemende taludhelling. In het kader van de doelstelling van het onderzoek betekent dit dat de gelaagdheid aanvankelijk een weinig instabieler met toenemende taludhelling is.

6 Samenvatting en konklusies

Onderzocht is, uitgaande van het gegeven dat in een put in omringend ondiep water een gelaagdheid is ontstaan, wat de invloed is van de taludhelling van de put op de stabiliteit van deze gelaagdheid indien de stromende bovenlaag de stagnante onderlaag door entrainment aantast. Het onderzoek is uitgevoerd in een hydraulisch model waarvan de schalen dusdanig zijn gekozen dat het interne Froudegetal ongeveer gelijk is aan dat in het prototype en dat het Reynoldsgetal voldoende hoog is om turbulente stroming te garanderen. In het model is bij vier taludhellingen met $\text{tg}\alpha = 1/10$, $\text{tg}\alpha = 1/7$, $\text{tg}\alpha = 1/7$ met trapjestalud en $\text{tg}\alpha = 1/3$ de verandering van de verticale dichtheidsverdeling als functie van de tijd gemeten op drie posities stroomafwaarts van elkaar met zogenaamde bewegende zoutopnemers (Bezo's). De snelheid u_0 van de stroming stroomopwaarts van de put is voor alle proeven gelijk. Uit het onderzoek zijn de volgende konklusies getrokken:

1. De niet-gelaagde stroming blijkt in de modelkonfiguratie met $\text{tg}\alpha = 1/10$ de wanden geheel te volgen en bij $\text{tg}\alpha = 1/3$ vanaf de putrand los te laten. In de configuratie met $\text{tg}\alpha = 1/7$ blijkt de stroming de taludhelling over de eerste halve meter te volgen om vervolgens los te laten. In de vierde, meer natuurlijke configuratie met een talud in trapjesvorm en $\text{tg}\alpha = 1/7$ blijkt globaal hetzelfde stromingsbeeld als in het model met vlakke helling en $\text{tg}\alpha = 1/7$ te ontstaan, uitgezonderd tussen de trapjes in, waar lokaal neren zijn waar te nemen.
2. In die configuraties waarvan de put als beginconditie tot de rand toe met pekkel gevuld is, ontstaat aanvankelijk een drielagensysteem ten gevolge van een verticale circulatiestroming. Deze circulatiestroming is niet het gevolg van het grote dichtheidsverschil toegepast in dit onderzoek: zij treedt ook op in situaties met een meer gangbaar dichtheidsverschil. Het blijkt dat het drielagensysteem zich stroomafwaarts in de put sneller ontwikkelt dan stroomopwaarts. Een evenwichtstoestand, in die zin dat het drielagensysteem zich niet verder meer ontwikkelt, wordt bij het huidige onderzoek niet bereikt. Bij de interpretatie is een eventuele invloed van de ontwikkeling van het drielagensysteem op de grootte van de entrainmentsnelheid niet in beschouwing genomen.

3. In de onder 2. beschreven configuratie blijkt de invloed van de taludhelling op de entrainmentsnelheid U_e gering te zijn; de entrainmentsnelheid zelf bedraagt ongeveer $U_e = 10^{-4}$ cm/s.
4. Desondanks is er een systematische toename in U_e waarneembaar met toenemende taludhelling. Ook een meer natuurlijke, dus onregelmatige taludvorm blijkt een enigszins grotere U_e tot gevolg te hebben in vergelijking met een glad talud onder dezelfde helling.
5. Zoals verwacht neemt U_e af met de tijd, behalve bij proef 1. Het is echter niet mogelijk de grootte van dU_e/dt uit de metingen te distilleren.
6. Uitgevoerd is ook een serie metingen met een met pekkel halverwege gevulde put als beginkonditie, om na te gaan hoe het stromingsbeeld er na verloop van langere tijd uitziet. Het blijkt dat de resultaten verkregen met de verschillende Bezo's per proef onderling nogal verschillen, wat waarschijnlijk grotendeels aan de nauwkeurigheid van de meetresultaten en aan de aanwezigheid van loslaatgebieden te wijten is. Gemiddeld blijkt de entrainmentsnelheid hier ongeveer $U_e = 10^{-5}$ cm/s.
7. De konstante C_1 in de relatie $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$ blijkt bij de proeven met halfvolle put globaal twee orden groter dan bij proeven met volle put. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de kondities bij de eerstgenoemde proeven buiten het ijkgebied van bovengenoemde relatie liggen.
8. De resultaten wijzen in de richting dat, in die gevallen dat de put half met pekkel gevuld is, U_e enigszins afneemt met toenemende $\tan \alpha$. Hier moet niet te veel waarde aan gehecht worden gezien de nauwkeurigheid van de resultaten.
9. Interpretatie van het bovenstaande voor prototypeomstandigheden leidt tot de konklusie dat, uitgaande van een gelaagdheid met het grensvlak ongeveer ter plaatse van de putrand, de entrainmentsnelheid ongeveer $U_e = 10^{-6}$ à 10^{-5} m/s bedraagt en geleidelijk afneemt, doch dat de afname minder groot is dan op grond van $U_e = C_1 u_o^3 / \epsilon g h_o$ verwacht mag worden.
10. Hoewel de invloed van de taludhelling op de stabiliteit van de grenslaag klein is, blijkt toch dat U_e aanvankelijk (volle put) systematisch toeneemt met toenemende taludhelling. Het verschil ten gevolge van de grootte van

$\operatorname{tg}\alpha$ neemt af met toenemende diepte (dus met het verloop van het afkalvingsproces) en lijkt zelfs omgeslagen te zijn als het grensvlak tot halverwege de put is gezakt: U_e neemt af met toenemende $\operatorname{tg}\alpha$.

REFERENTIES

- 1 KIT, E., BERENT, E., VAJDA, M., "Vertical mixing induced by wind and a rotating screen in a stratified fluid".
To be published in the Journal of the Hydraulic Research.
- 2 Waterloopkundig Laboratorium, "Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde-dam, selektief afzuigen, tweedimensionaal onderzoek".
WL-verslag M 1204, juli 1973.
- 3 Waterloopkundig Laboratorium, "Momentum and mass transfer in stratified flows".
WL-Report R 880, December 1974.
- 4 SCHLICHTING, H., "Grensschicht-Theorie".
Verlag G. Bram, Karlsruhe.
- 5 KANTHA, L.H., PHILLIPS, O.M., AZAD, R.S., "On turbulent entrainment at a stable density interface".
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 79, 1977.

	prototype	model	schalen
h_o	3 m	4,5 cm	$n_{h_o} = 67$
h_l	30 m	45 cm	$n_{h_l} = 67$
u_o	5 cm/s	9,8 cm/s	$n_u = 0,5$
ρ_o	$\sim 1000 \text{ kg/m}^3$	$\sim 1000 \text{ kg/m}^3$	
$\rho_l^{*)}$	$\sim 1001 \text{ kg/m}^3$	$\sim 1160 \text{ kg/m}^3$	
ϵ	0,001	0,16	$n_\epsilon = 160$
$F_i = \frac{u_o}{\sqrt{\epsilon g h_o}}$	0,29	0,38	$n_F = 0,8$
$Re = \frac{u_o h_o}{\nu}$	150×10^3	$4,5 \times 10^3$	$n_R = 33$
$\text{tg}\alpha$	1/3, 1/7, 1/10	1/3, 1/7, 1/10	$n_\alpha = 1$

Definities in figuur 1

*) Bij voorgaande korrespondentie is steeds vermeld $\rho_l = 1200 \text{ kg/m}^3$.

Het op het WL aanwezige pekelt heeft echter een maximale dichtheid van ongeveer $\rho_l \approx 1160 \text{ kg/m}^3$.

Tabel 1 Afmetingen en stromingsparameters

proefnr.	tgα	h _o ¹⁾ [cm]	u _o ²⁾ [cm/s]	Δρ [kg/m ³]	x ₁ ²⁾ [cm]	x ₂ ²⁾ [cm]	x ₃ ²⁾ [cm]	type ³⁾	$\bar{u}_e \cdot 10^4$ ⁴⁾ [cm/s]
1	1/10	4,3	9,8	162	300	430	600	A	1,1
2	1/10	27,3	9,8	158	350	430	550	B	0,18
3	1/7	3,0	9,8	158	150	430	750	A	1,1
4	1/7	26,6	9,8	155	250	430	650	B	0,10
5	1/7	5,1	9,8	19	150	430	750	A	-
6	1/7 trapjes	4,5	9,8	153	150	430	750	A	1,2
7	1/7 trapjes	26,8	9,8	156	250	430	650	B,C	0,11
8	1/7 trapjes	9,9	9,8	152	250	430	650	A,B	0,40
9	1/3	4,5	9,8	153	150	430	750	A	1,1
10	1/3	18,8	9,8	152	150	430	750	B,C	0,04 - 0,13

1) h_o ten opzichte van NAP (= waterspiegel bij stilstaand water)

2) x₁ = x van Bezo 1, etc., zie figuur 1

3) zie figuur 3

4) tabel 3, laatste kolom: "gecorrigeerde waarden"

Tabel 2 Proevenprogramma, begincondities en stabiliteitsparameters

proefnr.	tgα	h _o [cm]	Totale meting ¹⁾						onderling vergelijkbaar ³⁾						
			Bezo 1		Bezo 2		Bezo 3		Bezo 1		Bezo 2		Bezo 3		
			U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	U _e 10 ⁴ [cm/s]	S _u [%]	gem. U _e 10 ⁴ [cm/s]
1	1/10	4,3	1,1	5	1,0	5	1,1	5	1,1		1,0		1,1		1,1
3	1/7	3,0	1,4	5	1,3	5	1,3	5	1,3		1,1		1,1		1,1
6	1/7 trap	4,5	1,1	5	1,0	5	1,0	5	1,0		1,2		1,2		1,2
9	1/3	4,5	1,4	5	1,4	5	1,3	5	1,4		1,3		1,3		1,3
8	1/7 trap	9,9	0,33	10	0,42	5	0,44	5	0,33		0,42		0,44		0,40
2	1/10	27,3	0,18	40	0,19	10	0,17	10	0,18		0,19		0,17		0,18
4	1/7	26,6	0,15	20	0,08	10	0,08	10	0,15		0,08		0,08		0,10
7	1/7 trap	26,8	0,04	60	0,16	10	0,13	10	0,04		0,16		0,13		0,11
10	1/3	18,8	0,14	40	0,18	10	0,14	10							0,04 - 0,13 ⁴⁾

1) analyse van alle meetpunten

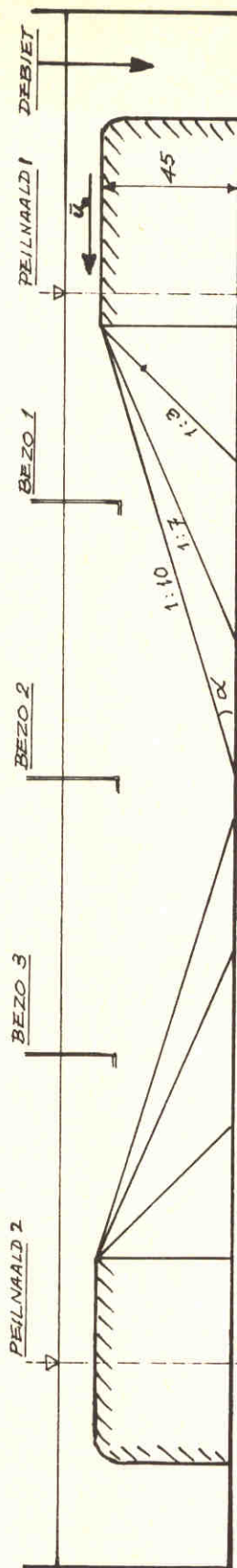
2) S_u is de relatieve standaarddeviatie

3) analyse van de voor de verschillende proeven onderling overeenkomstige meetpunten

4) omgerekend naar bovenlaagdikte h_o = 27 cm

Tabel 3 Entrainmentsnelheden

POMP +
DEBIETMETER



25,5
X=0 cm

X₁

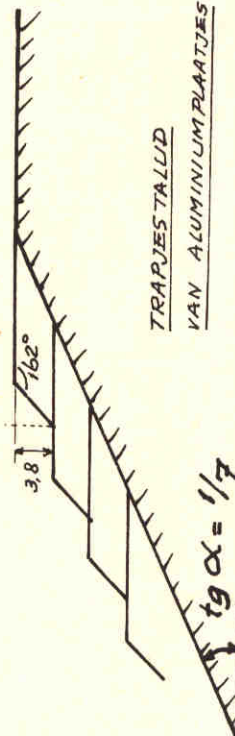
X₂

X₃

X=900 cm

ZIJ-AANZICHT

11,3 20,6



$\alpha = 1/7$

MATEN IN CM

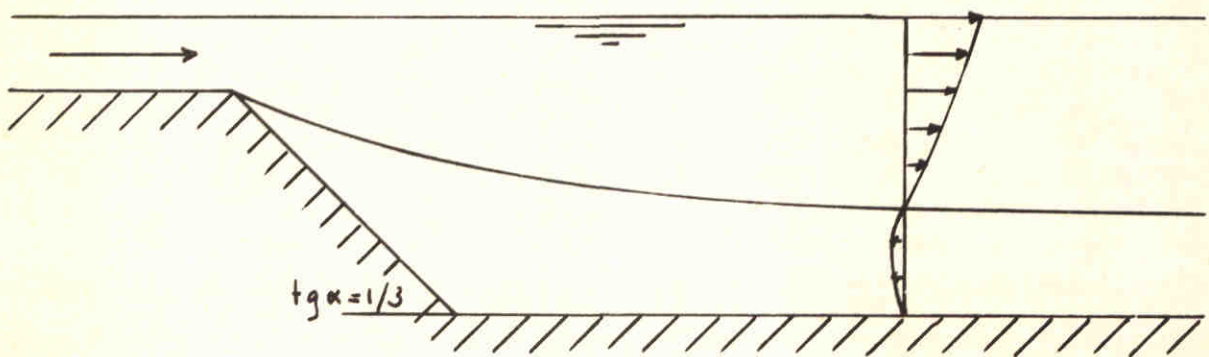
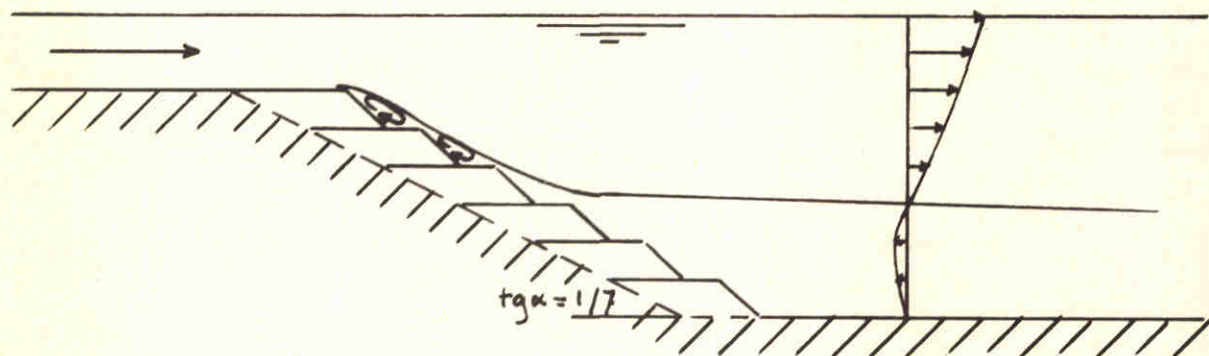
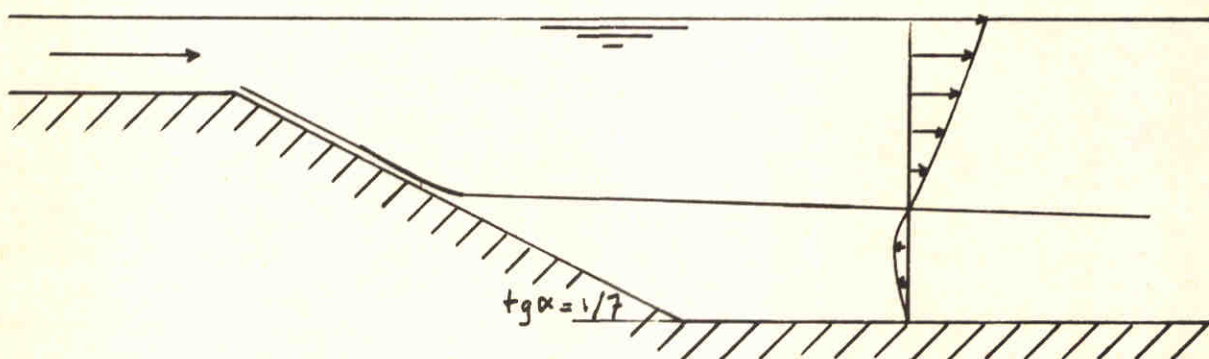
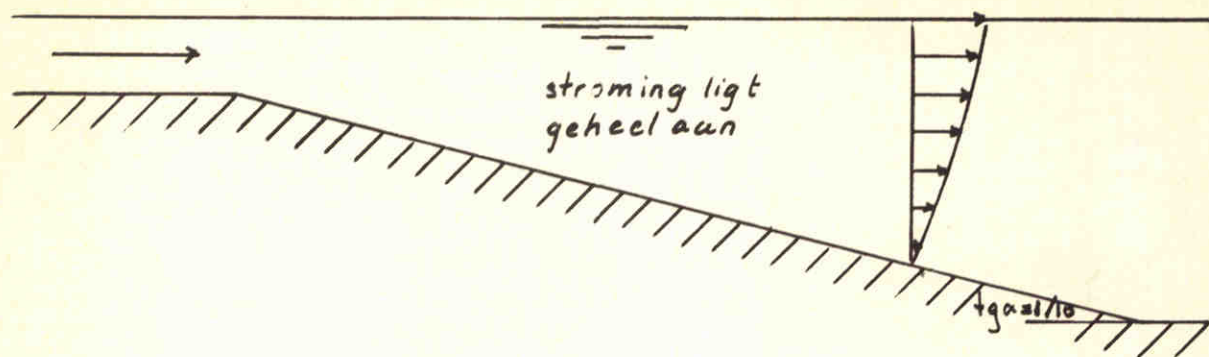
MODEL EN MEETOPSTELLING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1663

FIG. 1

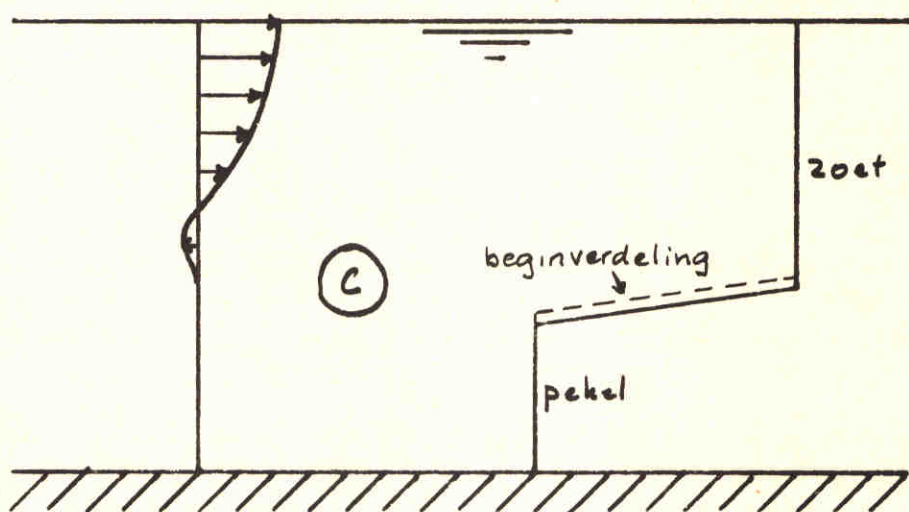
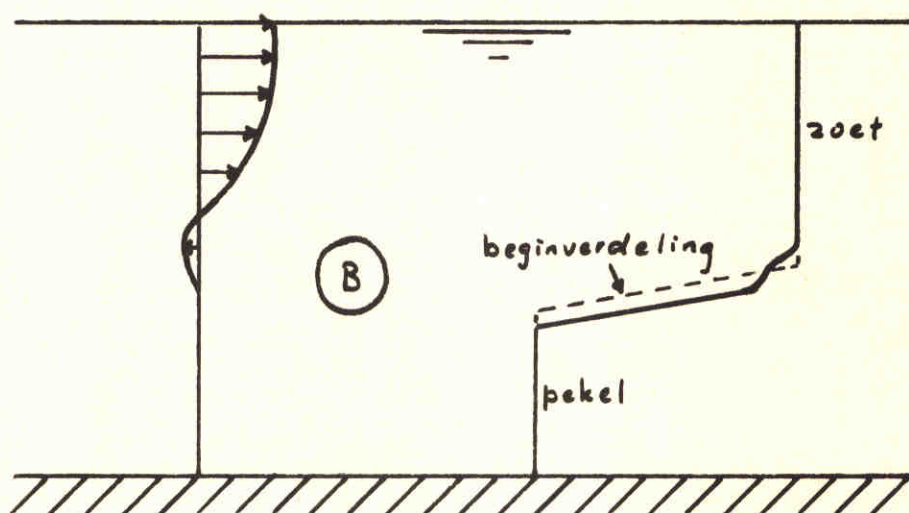
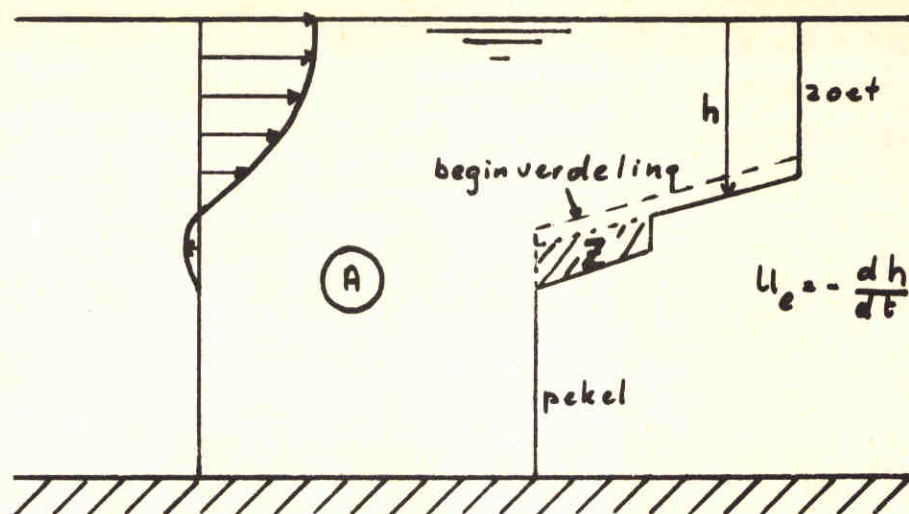
A4



Kwalitatief stromingsbeeld voor homogene omstandigheden.

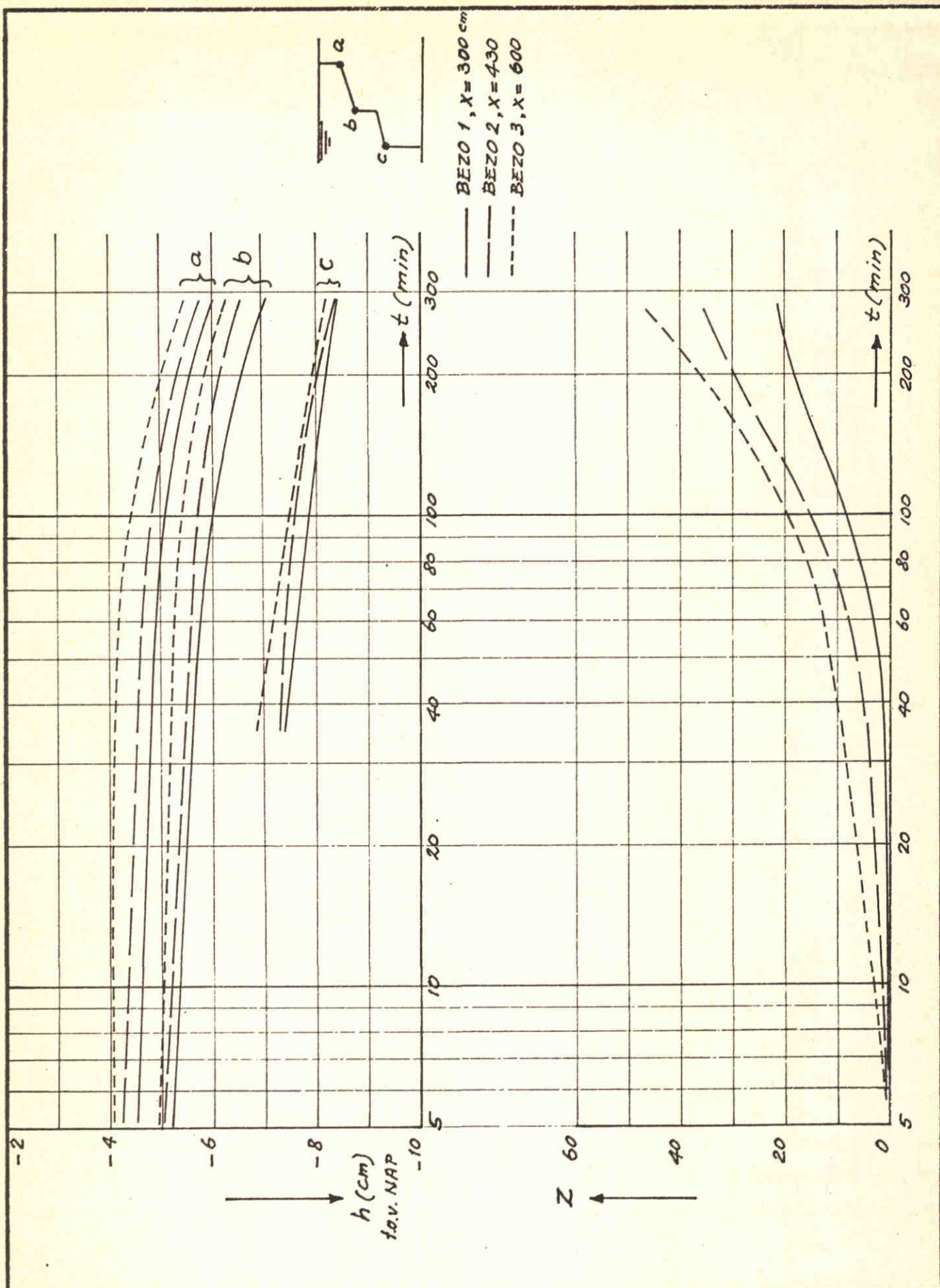
tekening is niet op schaal!

A4



snelheids- en dichtheidsverdeling

Kwalitatief beeld van snelheids- en dichtheidsverdeling



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

PROEF: 1
 $\Delta p = 162 \text{ kg/m}^3$

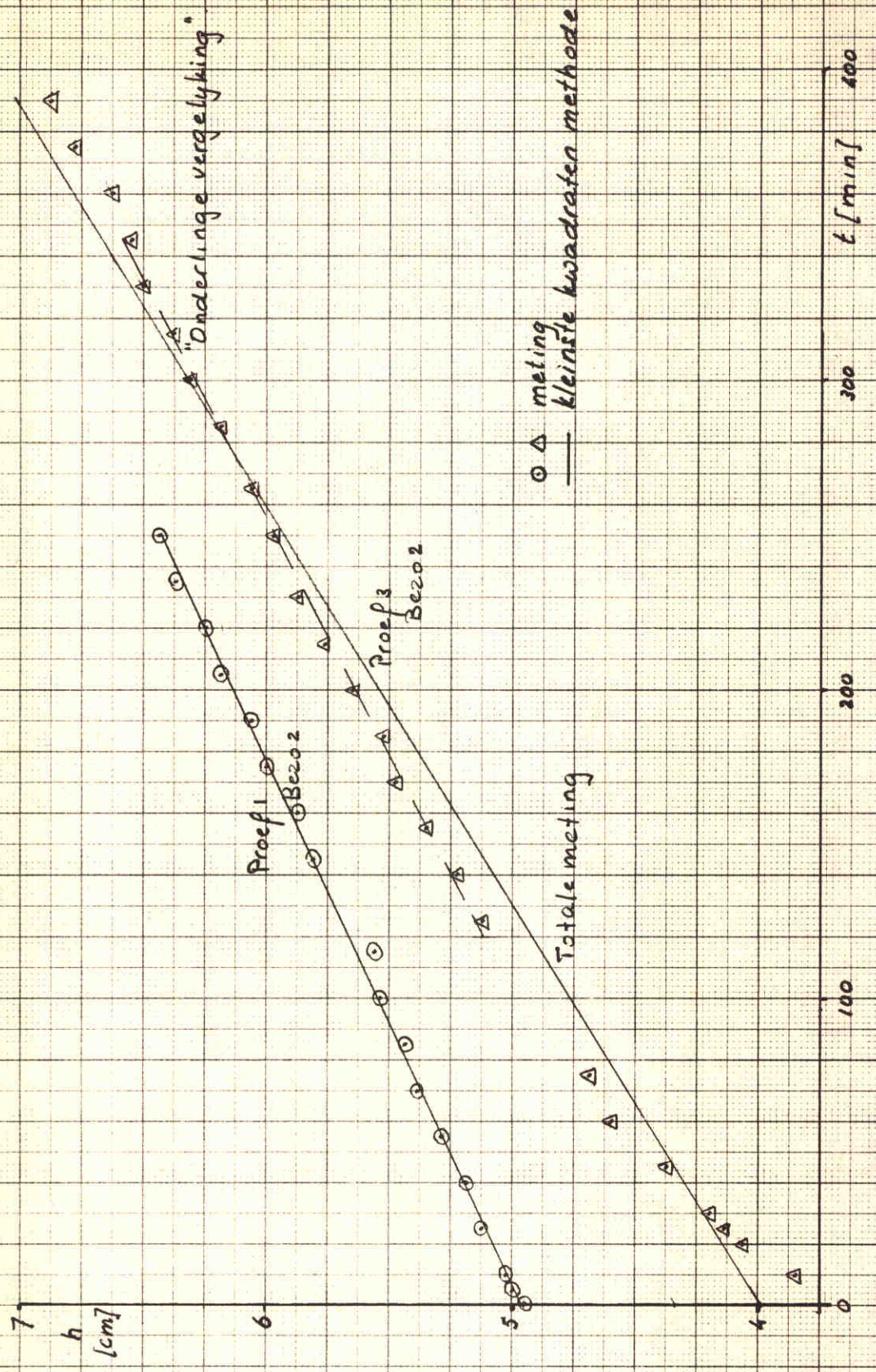
$\text{tg} \alpha = 1/10, h_0 = 4,3 \text{ cm}$

A4

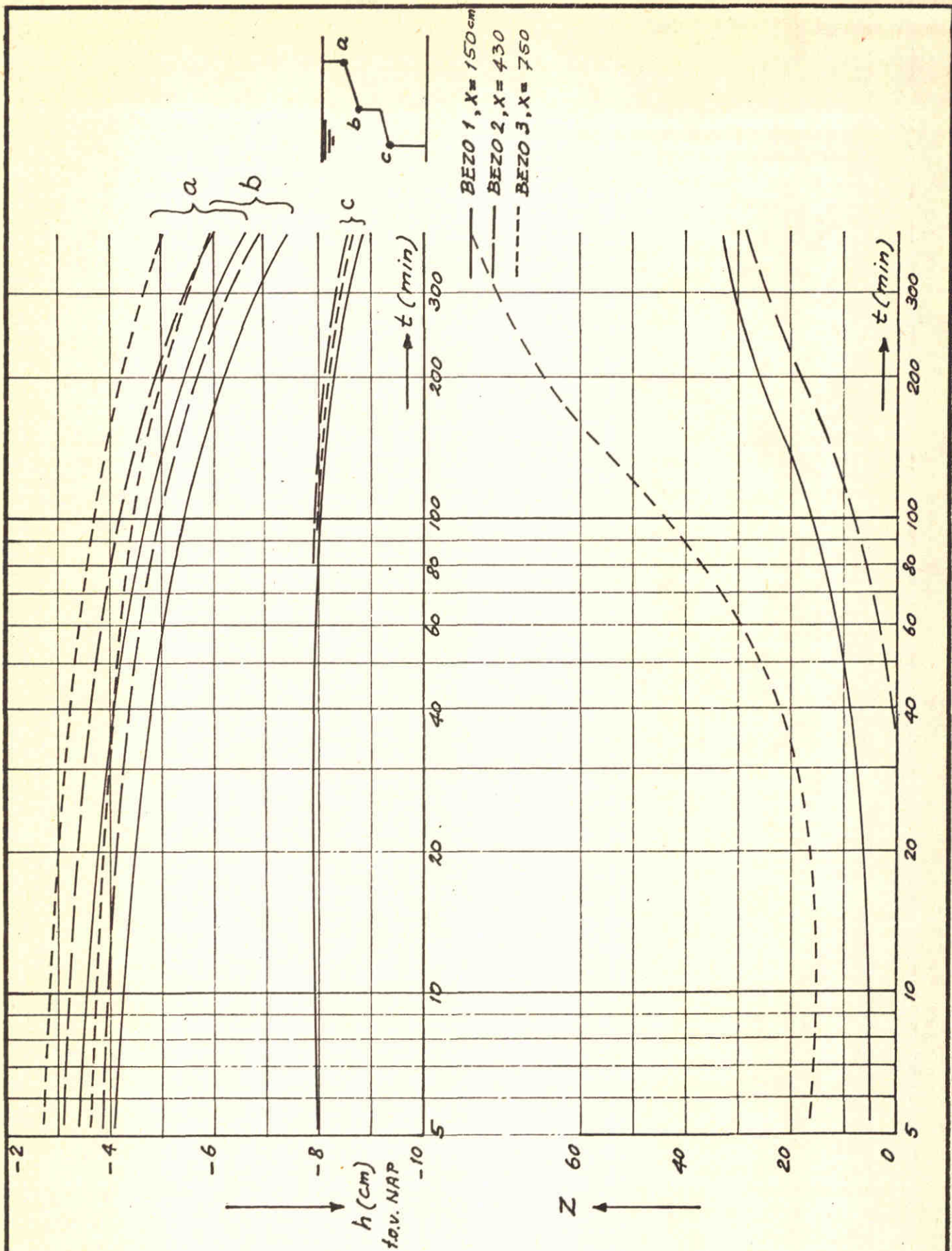
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1663

FIG. 4



Zakking h van het grensvlak als functie van de tijd voor proef 1 en 3



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

PROEF : 3

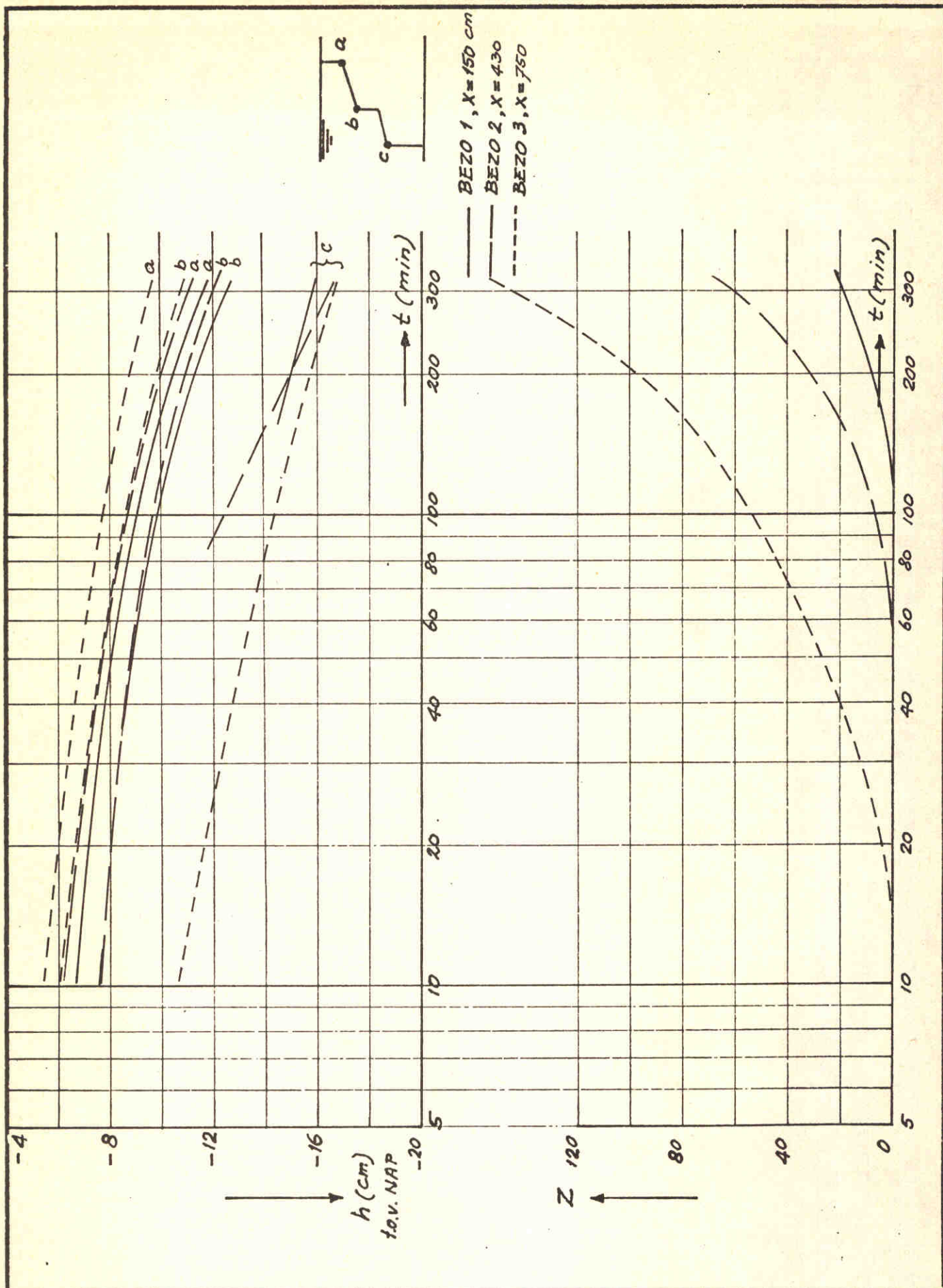
$\Delta\rho = 158\ kg/m^3$

$tg\alpha = 1/7, h_0 = 3,0\ cm$

A4

M 1663

FIG. 6



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

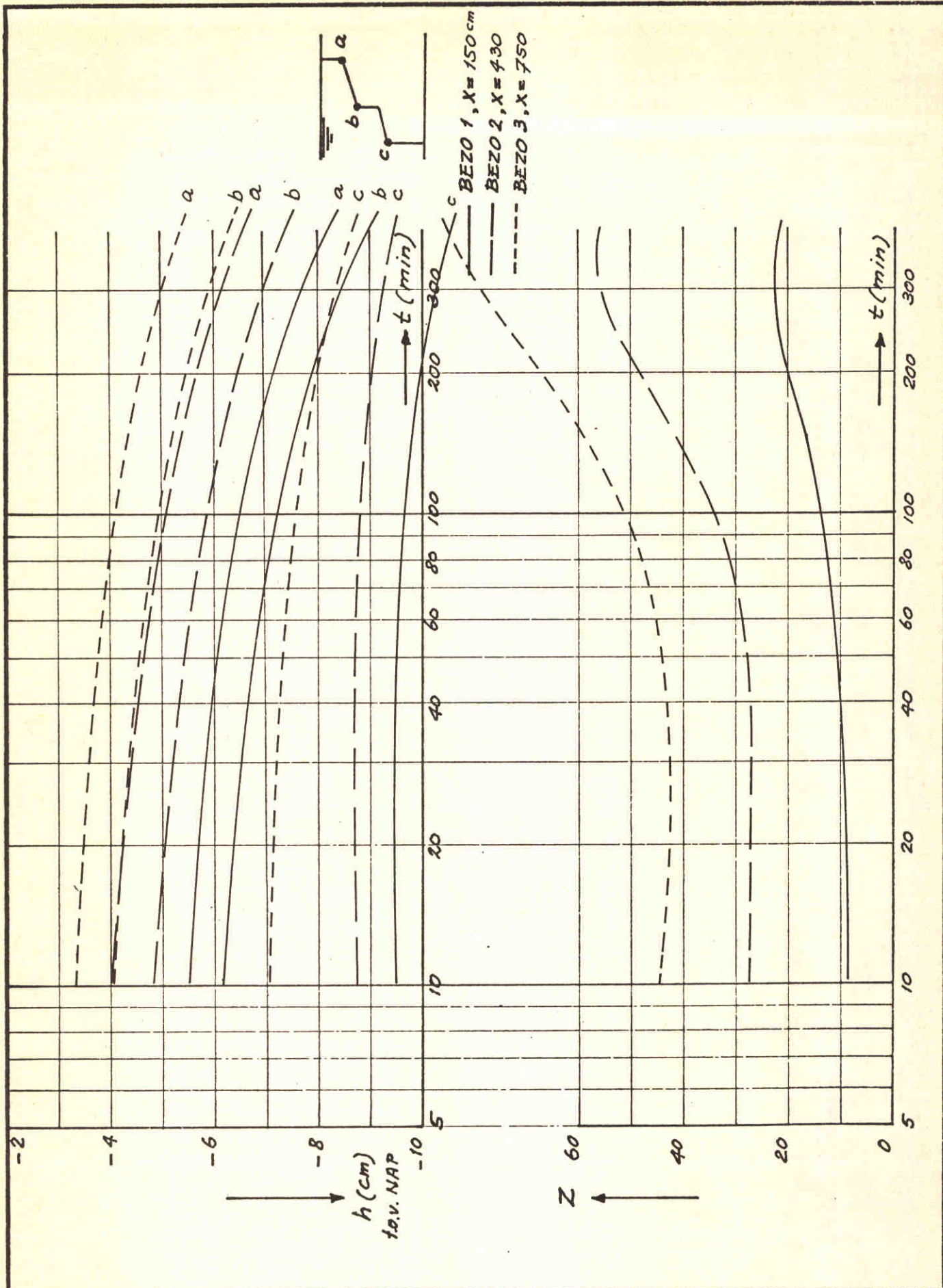
PROEF: 5
 $\Delta p = 19 \text{ kg/m}^3$

$t_9 \alpha = 1/7, h_0 = 5.1 \text{ cm}$

A4

M 1663

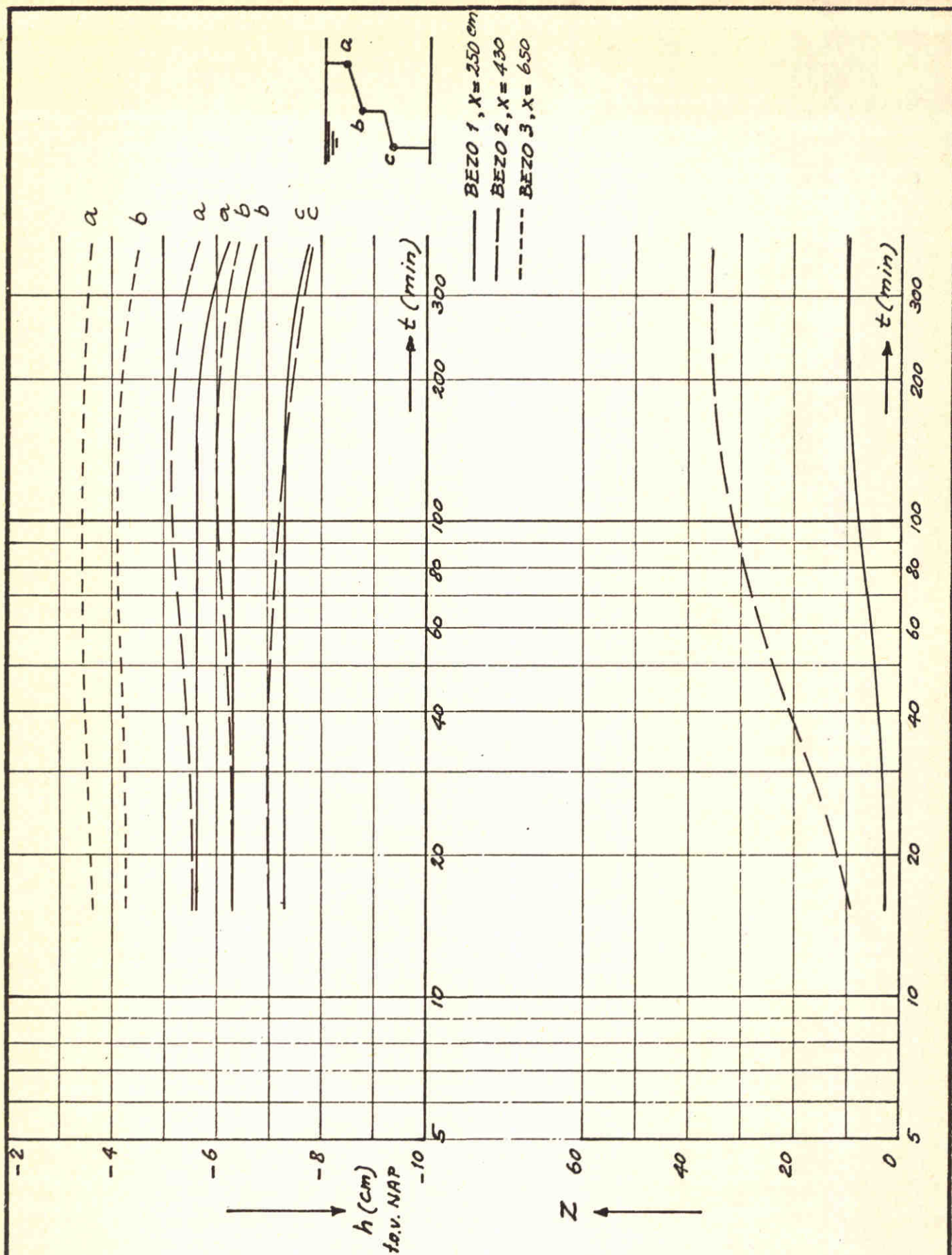
FIG. 7



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

PROEF: 6
 $\Delta \rho = 153 \text{ kg/m}^3$
 $\text{tg } \alpha = 1/7, h_0 = 4,5 \text{ cm}$

A4



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

PROEF : 8

$\Delta\rho = 152 \text{ kg/m}^3$

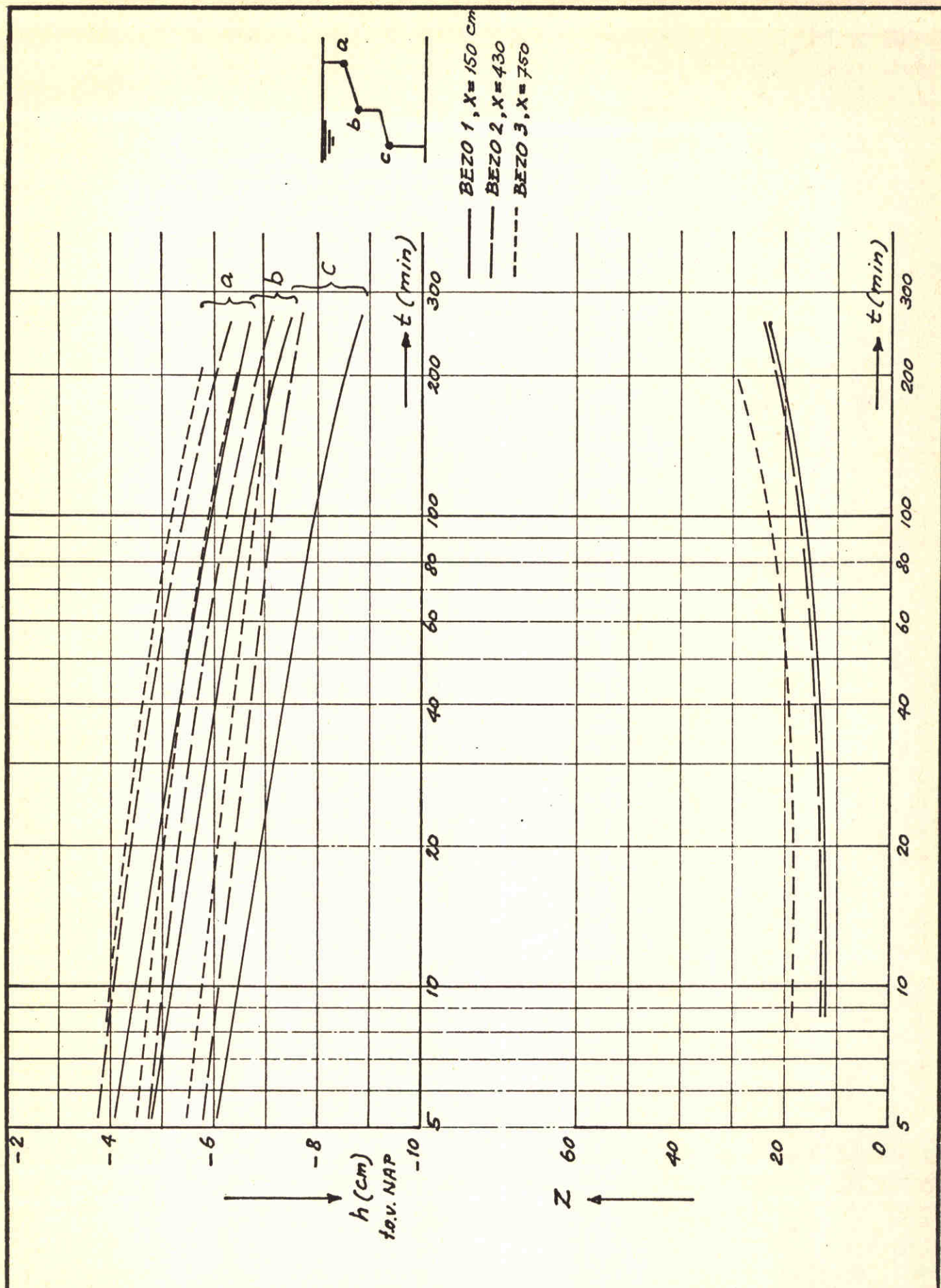
$\text{tg}\alpha = 1/7, h_0 = 9.9 \text{ cm}$

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1663

FIG. 9



VERANDERING VAN HET GRENSVLAK IN
PLAATS EN VORM MET DE TIJD

PROEF : 9
 $\Delta p = 153 \text{ kg/m}^3$
 $\tan \alpha = 1/3$, $h_0 = 4.5 \text{ cm}$

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1663

FIG. 10

