



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
INSTITUTIONEN FÖR VATTENBYGGNAD

ISDAMMAR

En laboratoriestudie

av

Per - Anders Jungqvist

Henrik Östman

Examensarbete i vattenbyggnad 1974 : 9

Göteborg

I S D A M M A R

En laboratoriestudie

av

Per-Anders Jungqvist

Henrik Östman

Examensarbete i vattenbyggnad 1974:9

PROGRAM

Examensarbete i vattenbyggnad 1974: 9

ISDAMMAR I FLODER

Examensarbetet är tänkt som ett laboratorieförsök för att dels verifiera tidigare uppställda modeller över isdammars mäktighet dels speciellt studera hur en sådan isdamm byggs upp i vattnets strömningsriktning då vattendjup och därmed vattenhastighet varierar från sektion till sektion.

OMFATTNING

- a) Läsning av några uppsatser om isdammar, isdämning samt om kraftspelet vatten-isdamm-strand
- b) Bestämning av lämpliga mätmetoder
- c) Modifiering av målsättningen, begränsning av problemet och upprättande av mätprogram
- d) Uppmontering av mätutrustning m m med hjälp av vattenbyggnads personal
- e) Genomförande av mätprogrammet
- f) Redovisning av a)-e) på ett institutionsseminarium varvid även en detaljerad disposition (synopsis) över slutrapporten skall presenteras
- g) Författande av slutrapport

HANDLEDARE

Lars Bergdahl, tel 81 01 00/1328

SAMMANFATTNING

Avsikten med detta examensarbete har varit att undersöka hur en isdamm byggs upp i en flod, och hur den växer till när vattenhastighet och vattendjup varierar från sektion till sektion, samt att undersöka tidigare uppställda teorier.

I försöken användes träklotsar, som släpptes ned i en glasränna med rinnande vatten. Dessa träklotsar stoppades upp i rännans nedströmsände och bildade ett täcke. Vattendjup och vattenflöde samt klotstäckets tjocklek mättes. Genom att sänka ned en kilformad låda i rännan erhöles en varierande tvärsektion längs en mindre del av rännan.

Först genomfördes en försöksserie med konstant tvärsektion. Dessa försök verifierade en tillväxtteori av Parisset-Hausser, som anger ett modifierat Froudes tal för bestämmande av det bildade klotstäckets tjocklek. De visade också att försöksanordningen med träklotsar var acceptabel för simulering av is i floder.

Därefter genomfördes två försöksserier där lådan nedsänkt i rännan gav en varierande tvärsektion. I dessa försök erhöles ett klotstäcke, vars tjocklek varierade med den varierande tvärsektionen. Den maximala tjockleken erhöles nedströms lådan, och visade sig bero av dels vattenhastigheten och dels av vattendjupet. Även den maximala tjocklekens läge i förhållande till lådan visade sig bero av vattenhastighet och vattendjup.

Något uttryck innehållande vattenhastighet och vattendjup för kvantifiering av klotstäckets tjocklek har inte kunnat konstrueras. Däremot visade en jämförelse mellan den experimentellt bestämda tjockleken t^{exp} och den teoretiskt beräknade tjockleken t^{teor} enligt tillväxtteorin, som bestäms av Froudes modifierade tal, följande: Nedströms lådans mittdel, som ger den minsta tvärsektionen i rännan, erhöles ett tjockare klotstäcke i experimenten än vad som angavs av Froudes tal. Detta förklaras av att de klotsar, som dök under klotstäcket när detta avancerat till minsta tvärsektionen, stannade upp och lade sig under det befintliga klotstäcket när de nådde den stora tvärsektionen där vattenhastigheten var lägre.

Vid lådans mittdel uppnåddes inte den teoretiska tjockleken i experimenten, vilket dels förklaras av att teoretiska tjockleken beräknades med ett vattendjup, som ökade efter täckets bildande och som därmed var för stort i beräkningarna. Dessutom erhålles en förhöjning av hastigheten och en sned fördelning av denna vid lådans mitt, som orsakar erosion och en förtunning av klotstället i detta avsnitt. Uppströms lådan växer klotstället till enligt Parisset-Haussers teori.

INNEHÅLL

	Sid.
SAMMANFATTNING	I.
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III.
LISTA ÖVER BETECKNINGAR	IV.
LISTA ÖVER FIGURER	VIII.
1. BAKGRUND OCH SYFTE	1
1.1 Problemställning	1
1.2 Tidigare studier	2
1.3 Denna studies syfte och omfattning	3
2. TEORI	5
2.1 Parisset-Hausser-Gagnons tillväxtteori	5
2.2 Erosion	7
3. ANVÄNDA HJÄLPMEDEL	10
4. FÖRSÖKENS UTFÖRANDE	12
4.1 Kalibrering av kraftgivare	12
4.2 Densitetsmätning	12
4.3 Kontroll av vattenhastighetens variation över ett rektangulärt tvärsnitt.	12
4.4 Verifiering av tillväxtteorin	12
4.5 Variabel sektion, liggande låda	13
4.6 Variabel sektion, stående låda	13
5. MÄTVÄRDEN	15
5.1 Verifiering av tillväxtteorin	15
5.2 Variabel sektion, liggande låda	15
5.3 Variabel sektion, stående låda	16
5.4 Mätproblem	16
6. RESULTAT	17
6.1 Bearbetning av mätvärden	17
6.2 Resultat	19
7. SLUTSATSER	35
7.1 Verifiering av tillväxtteorin	35
7.2 Variabel sektion, liggande låda	35
7.3 Variabel sektion, stående låda	37

BETECKNINGAR

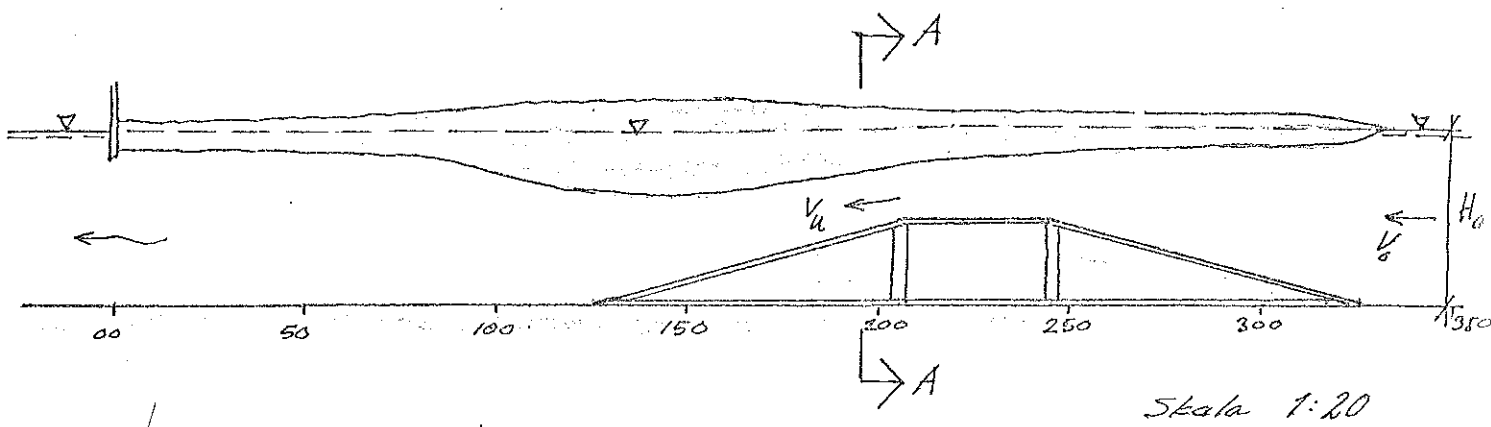
A	våt tvärsnittsarea = $b \cdot H$
A_0	våt tvärsnittsarea uppströms täcket = $B \cdot H_0$
a	tvärsnittsarea under täcket = $b \cdot h$
B	rännans bredd
b	aktuell bredd = $B - y$, $b = b(x)$
d_s	representativ kornstorlek
F	Froudes tal = v/\sqrt{gH}
F_m	Froudes modifierade tal = $v/\sqrt{2gH}$
F_{mc}	kritiskt F_m då $v = v_{cr}$
f	friktionskoefficient
f_{is}	friktionskoefficient mellan vatten och täcke
f_{bs}	friktionskoefficient mellan vatten och botten-sidor
g	tyngdaccelerationen
H	aktuellt vattendjup
H_0	vattendjup uppströms klotstäckets
h	aktuellt vattendjup under täcket = $H - t_u$
I	energilinjens lutning
k_s	ekvivalent sandråhet
L	klotstäckets längd
l	klotsarnas längd
P	våta perimetern
Q	vattenflöde
R	hydrauliska radien = A/p
T	tid i sekunder
t	klotstäckets tjocklek = $t_u + t_0$
t_u	klotstäckets tjocklek under vattenytan
t_0	klotstäckets tjocklek ovan vattenytan
v	vattenhastighet = Q/A
v_0	vattenhastighet uppströms täcket
v_u	vattenhastighet under täcket = Q/a
x	koordinat längs rännan, origo vid länsan
y	bottens koordinat över referensnivån (referensnivån = rännans botten)
z	vattenytans koordinat över referensnivån

ρ	vattnets volymvikt
ρ'	klotsarnas volymvikt
τ	skjuvspänning
τ_c	skjuvspänning vid begynnande erosion

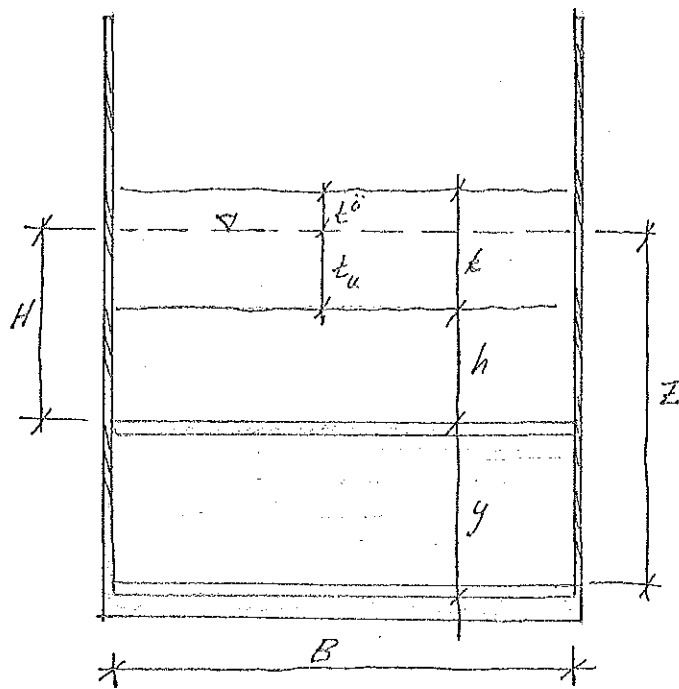
Index "exp" anger experimentella värden.

Index "teor" anger teoretiska värden.

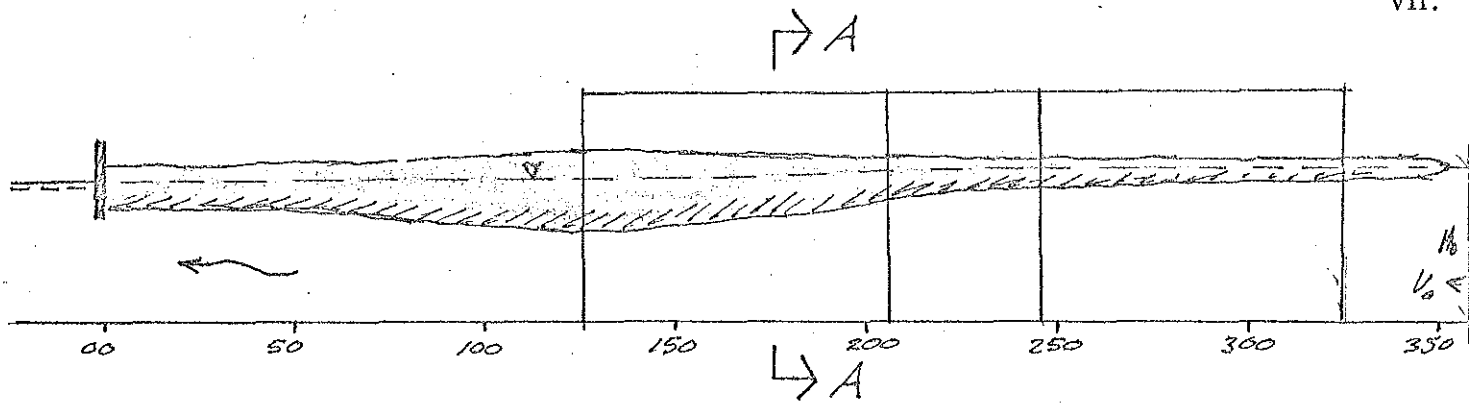
Sifferindex anger avståndet i cm uppströms länsan.



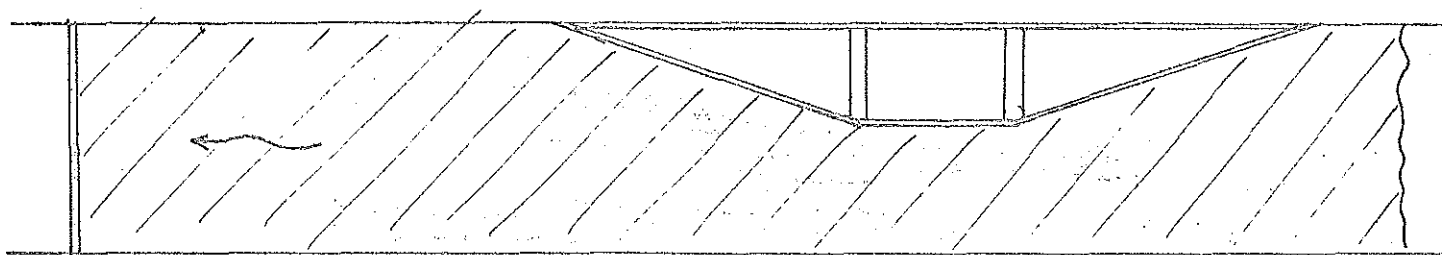
snitt A-A



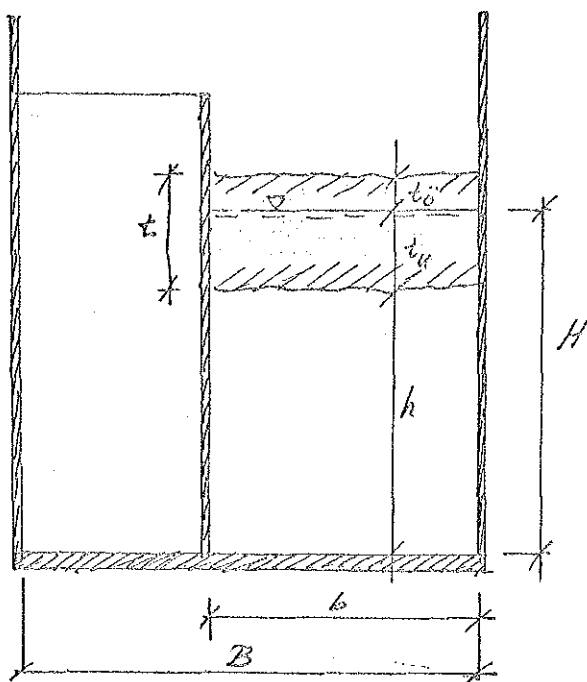
Figur 0.1. Beteckningar. Försök med "liggande låda" (minskad höjd).



Skala 1:20



A-A



Skala 1:10

Figur 0. 2. Beteckningar. Försök med "stående låda" (minskad bredd).

FIGURER

	Sid.
0.1 Beteckningar. Försök med "liggande låda" (minskat vattendjup).	VI.
0.2 Beteckningar. Försök med "stående låda" (minskad bredd).	VII.
2.1 Beteckningar. Konstant sektion.	5
2.2 Froudes modifierade tal F_m som funktion av relativa tjockleken t/H .	7
2.3 Tvärsnitt av rännan.	8
3.1 Principiellt utseende av mätrigg med länsa.	11
3.2 Skiss över den låda, som använts för att minska djup eller bredd.	11
4.1 Lådans placering i försöken med "liggande låda".	14
4.2 Lådans placering i försöken med "stående låda".	14
6.1 Exempel på täckets verkliga tjocklek jämfört med den teoretiska. (Konstant tvärsektion).	21
6.2 Samband mellan Froudes modifierade tal F_m och relativa tjockleken t/H .	22
6.3-6.5 Försök med "liggande låda".	24-26
6.6 Klotstäckets tjocklek och form då vattenhastigheten varierar och vattendjupet är konstant.	27
6.7 Klotstäckets tjocklek och form då vattendjupet varierar och vattenhastigheten är konstant.	27
6.8-6.10 Försök med "stående låda".	29-31
6.11-6.14 Fotografier från några försök.	33-34

1 BAKGRUND OCH SYFTE

1.1 Problemställning.

1.1.1 Bakgrund

Den årliga isläggningen av sjöar, älvar och hav skapar många problem. Ett av dessa är de skador på anläggningar och konstbyggnader som orsakas av is i rörelse, ett annat de isdammar som kan bildas i strömmande vatten. Isdammarna kan förorsaka uppdamning av vatten, vilket försvårar utnyttjandet av vattnet vid t ex kraftverk och vattenförsörjningsanläggningar. Stopp i kanaler och vattendrag kan förorsaka mycket dyrbara skador.

Som exempel kan nämnas den isdamm som bildades vintern 1967-68 i Israel River, New Hampshire, USA. På grund av köldperioder och töväder bildades en sådan anhopning av is att en katastrofal uppdamning av vatten och tillhörande skador för en halv miljon dollar orsakades.

I Sverige stjälpte en av bropelarna vid ett brobygge över Torne älv på grund av den kraftiga isgången i älven våren 1971.

Vid tidigare kraftverksbyggen i Sverige togs stor hänsyn till risken för isanhopning vid intagskanalen. I de nyare vattenkraftsanläggningarna placeras vattenintagen ofta väl under sänkningsgränsen i den uppdamnda sjön eller vattendraget, så att isdammar inte kan uppstå. Däremot har problemet ånyo aktualiserats vid byggandet av de stora intagskanalerna i anslutning till kärnkraftsanläggningarna. De stora vattenföringar som råder i dessa kanaler ger starka vattenströmmar som påverkar stora områden med isflak eller istäcke i havsvikarna utanför intaget.

1.1.2 Beskrivning av problemet.

Problemet med isdammar som bildas i vattendrag skall här beskrivas närmare. I början av vintern bildas stora mängder isflak som flyter nedför vattendragen. När isflaken når en flodsektion med långsammare vatten, eller stöter på ett hinder, packas de ihop och bildar ett sammanhängande istäcke eller en isdamm.

På senvintern påverkar solvärmnen och det ökande vattenflödet istäcket så att det bryts sönder. De bildade isflaken transporteras nedför vattendragen tills de stöter på ett hinder eller en sektionsförändring och bildar en isdamm. De hinder som uppträder i ett vattendrag är dels naturliga hinder, såsom förträngning och uppgrundning i en sektion, förändring i vattendragets linjeföring (floodkrök, forssträcka) och dels konstbyggnader och anläggningar som kan utgöra hinder. Bland de senare kan nämnas bropelare, hamnpirar och kanalintag, samt speciellt islänisor och intagsgaller som just används för att hindra att isen orsakar skador på byggnader respektive pumpar eller turbiner.

De isflak som stannar upp vid ett hinder packas samman och bildar en isdamm. Friktionsförlusterna mot isdammens undersida orsakar en höjning av uppströmsvattenytan. Vattenhastigheten här sjunker och ytterligare isflak anhopas. När dammen blir tillräckligt tjock och därmed vattenhastigheten hög, rycks en del isflak med och dyker under isdammen. Dess tillväxt beror av vattenflödet och tvärsektionen i vattendraget. En förträngning, uppgrundning eller ökning av tvärsektionen ändrar förutsättningarna för isdammens tillväxt.

1.2 Tidigare studier.

Intresset för och behovet av isforskning har ökat starkt under senare år, vilket sammanhänger med det ökade behovet av sjötransporter samt insikten om att man genom ingenjörsåtgärder kan förbättra "vintermiljön" ur många synpunkter. Detta gäller möjligheterna att förbättra vintersjöfarten, att minska riskerna för översvämningar förorsakade av isdammar, att minska driftstörningar vid vattenkraftstationer och kylvattenanläggningar förorsakade av isanhopningar m m. Stora ekonomiska besparingar kan här göras och de stora naturrikedomarna, inte minst oljeförekomsterna, i de arktiska områdena accelererar isforskningen i dessa områden.

Påtagliga resultat som uppnåtts är t ex St Lawrence Sea Way med året-runt-sjöfart upp till Montreal, samt de många internationella organisationer med is som intresseområde och med tillhörande symposier, som bildats. Av de senare kan nämnas IAHR, som har hållit issymposier i Reykjavik 1970, i Leningrad 1972, i Budapest 1974 och i New Hampshire, USA 1975.

Problemet med isdammars tillväxt, som detta arbete avser, har studerats av ett flertal forskare. Bland dessa kan nämnas kanadensaren Michel samt Ernest Pariset och René Hausser, vars teorier ligger till grund för vårt arbete. Dessa teorier har undersökts och utvecklats efter laboratorieförsök, där man med hjälp av paraffin- och träklotsar har modulerat is. Mätningar av vattenhastighet och istjocklek har också utförts i naturliga vattendrag, bl a i St Lawrence-floden och Beauharnois-kanalen.

Vid utbyggnaden av Burfells kraftstation i floden Thjorsá på Island gjordes en modell av ett flodavschnitt där en damm skulle placeras. I modellen, som byggdes vid Norges Tekniska Högskola i Trondheim, studerades förutom sedimenttransport även transport och anhopning av is. Det senare var den huvudsakliga uppgiften och man använde sig här av en sedimentationsanalogi för is där massan är lättare än vatten och en negativ fallhastighet (= stighastighet) erhålls i de använda differentialekvationerna.

1.3 Denna studies syfte och omfattning.

1.3.1 Syfte.

Examensarbetet är tänkt som ett laboratorieförsök för att dels verifiera tidigare uppställda modeller över isdammars mäktighet, dels speciellt studera hur en sådan isdamm byggs upp i vattnets strömriktning då vattendjup och därmed vattenhastighet varierar från sektion till sektion.

I arbetet ingår också försök till mätning av den kraft som en isanhopning åstadkommer på ett hinder uppsatt vinkelrätt flödet, tvärs över floden.

1.3.2 Omfattning.

Den modell som vi med laboratorieförsöken ämnar undersöka är ett av Pariset och Hausser uppställt samband mellan:

- 1) den tjocklek t med vilken ett istäcke avancerar mot strömriktningen vid tillförsel av flytande isblock
- 2) uppströmsvattendjupet H
- 3) hastigheten v uppströms iskanten.

Ett modifierat Froudes tal ges av detta samband:

$$F_{cr} = \frac{v}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho} \cdot \frac{t}{H} \left(1 - \frac{t}{H}\right)}$$

F_{cr} , dvs kritiskt värde, avser det värde då tillströmmande isflak dyker under den befintliga iskanten och lägger sig under istäcket. Detta värde anger då den teoretiskt maximala tjockleken som kan bildas under givna förhållanden. ρ och ρ' är vattnets resp. isens densitet. Även andra teorier som kan inverka på istäckets tillväxt skall undersökas. (Se vidare kap.2 Teori).

Försöken utförs i en rektangulär ränna som har konstant bredd och horisontell botten och liknar därmed mer en konstgjord kanal än en flodbädd. Isen simuleras med små träklotsar av furu. Rännans botten och sidor består av plåt respektive glas, som har mycket liten råhet jämfört med en naturlig flodbädd. I en del av försöken minskades rännans tvärsektion, men endast på en kort sträcka.

2. TEORI

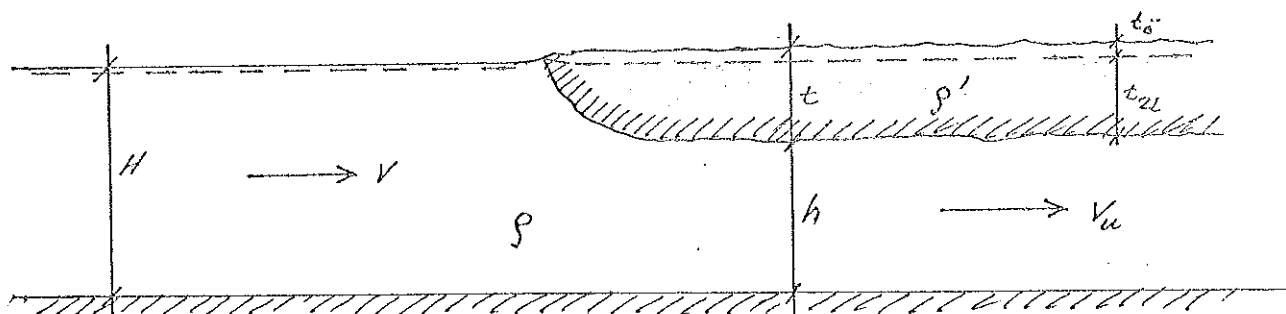
2.1 E Pariset, R Hausser och A Gagnons teori.

Samband mellan Froudes tal och isanhopningens tjocklek.

Förr ansåg man att villkoret för att ett isflak skall ryckas ned under en iskant var att ythastigheten är större än ca 0,6 m/s. Enligt nyare forskningsresultat skall Froudes tal (F) vara större än ett visst värde. Kivisild (1959) bestämde detta värde till 0,08.

Pariset m fl (1966) har analyserat detta teoretiskt och funnit ett samband mellan Froudes tal och isanhopningens tjocklek.

Studera ett tvärsnitt enligt figur 2.1.



Figur 2.1. Längdsnitt av kanal med istäcke.

Jämför energinivåerna i sektion (1) och (2). Om vi antar att förlusterna mellan de två sektionerna är mycket små, erhåller vi med beteckningar enligt figuren:

$$H + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{v_u^2}{2g} + t_u \quad (1)$$

Flytjämvikt ger

$$\rho g t_u = \rho' g t \quad \text{vilket ger} \quad t_u = t \cdot \frac{\rho'}{\rho} \quad (2)$$

För att vatten ej skall rinna över framkanten skall

$$H + \frac{v^2}{2g} \leq h + t \quad (3)$$

Kombineras (1), (2) och (3) erhålles

$$v_u \leq \sqrt{2g \cdot \frac{\rho - \rho'}{\rho} t} \quad (4)$$

Kontroller i lab. rännor och på fältet har verifierat (4) och har visat att istäcket avancerar med en tjocklek given av

$$v_u = \sqrt{2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} t} \quad (5)$$

Ersätt v_u med v :

$$v \cdot H = v_u \cdot h \quad \text{där } h = H + \frac{v^2}{2g} - t$$

$$\text{vilket ger } v = v_u \left(1 + \frac{v^2}{2gH} - \frac{t}{H} \right) \quad (6)$$

Eftersom $\frac{v^2}{2gH}$ vanligtvis är försumbar får vi

$$v = \sqrt{2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} t} \left(1 - \frac{t}{H} \right) \quad (7)$$

Froudes tal $F = \frac{v}{\sqrt{gH}}$ därför skriver vi

$$F = \frac{v}{\sqrt{gH}} = \sqrt{2 \frac{\rho - \rho'}{\rho} t/H} \left(1 - \frac{t}{H} \right) \quad (8)$$

Pariset föredrar att skriva

$$F_m = \frac{v}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho} t/H} \left(1 - \frac{t}{H} \right) \quad \text{där } F_m \text{ kallas "modifierat" Froudes tal.}$$

Grafiskt kan vi återge ekvationen genom att uttrycka F_m som en funktion av t/H . Se figur 2. 2.

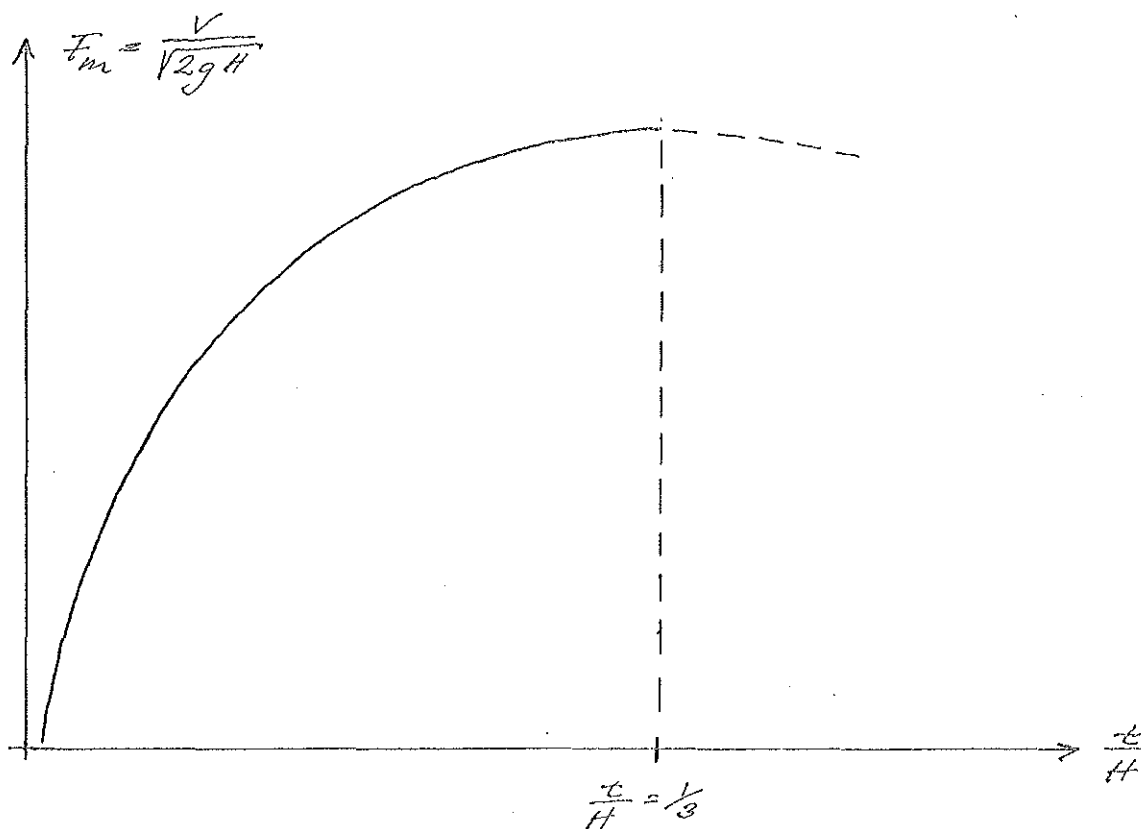
Figuren visar att tjockleken av uppströmskanten minskar med minskad flödes-
hastighet eller ökat djup. Kurvan har ett maximum vid $t/H = 1/3$ och dess

värde beror på isens densitet.

Pariset m fl har verifierat kurvan i fält och på laboratorium.

När Froudes tal når maxvärdet innebär detta att hastigheten är så hög att klotsarna dyker under täcket, som därmed ökar i tjocklek, och förorsakar en höjning av uppströmsvattenytan. På detta sätt minskar vattenhastigheten och maxvärdet kan således inte överskridas.

Teorin kan användas för andra material än is. (I vår undersökning har träklotsar använts.)



Figur 2. 2. Froudes modifierade tal F_m som funktion av relativa tjockleken t/H .

2. 2 Erosion.

För att utröna om någon erosion förekommer har följande teori använts.

Erosion på undersidan av klotstäckets kan jämföras med erosion av friktionsmaterial.

Vi betraktar vår kanal med sitt klotstäckte som ett rör. Då gäller enligt Darcy - Weisbachs ansats att skärspänningarna är

$$\tau = \frac{f}{4} \rho \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

där f = friktionskoefficienten.

Allmänt beräknas friktionskoefficienten enligt Prandtl

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3,72 \cdot 4 R}{k_s} \quad (10)$$

där R = hydrauliska radien

och k_s = ekvivalent sandråhet.

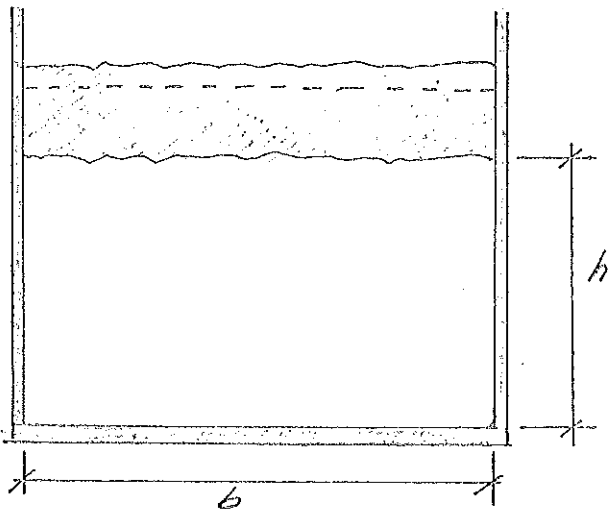
Enligt teori för bergtunnlar (Cederwall och Rahm, 1964) beräknas friktionskoefficienten för botten - sidor (f_{bs}) och klotstäckte (f_{is}) var för sig på hela den våta sektionens hydrauliska radie. Dessa värden viktas sedan samman till ett ekvivalent f -värde (f_{ekv}) enligt

$$f_{ekv} = \frac{f_{bs} \cdot l_{bs} + f_{is} \cdot l_{is}}{l_{bs} + l_{is}} \quad (11)$$

där $l_{bs} = b + 2h$

och $l_{is} = b$

Se figur 2.3.



Figur 2.3. Tvärsnitt av rännen.

Vid den kritiska hastigheten v_c uppstår erosion och då är skärspänningen

$$\tau_c = 0,06 (\rho - \rho') g d_s \quad (\text{där } \rho > \rho') \quad (12)$$

där d_s = representativ kornstorlek. Ekvation (12) gäller under förutsättning att $Re = \frac{v \cdot \nu}{d_s} > 600$, vilket gäller i våra försök. Ekvation (9) och (12) ger med $\rho' = 600 \text{ kg/m}^3$

$$v^2 = \frac{1}{f} \cdot 0,0685$$

$$\text{där } v = \frac{Q}{b \cdot h}$$

Detta ger

$$h = 3,82 \frac{Q}{b} \sqrt{f} \quad (13)$$

Om h_{exp} är mindre än detta värde sker erosion av klotstäckets undersida.

Eftersom f är beroende av h löses ekvationen med passningsräkning.

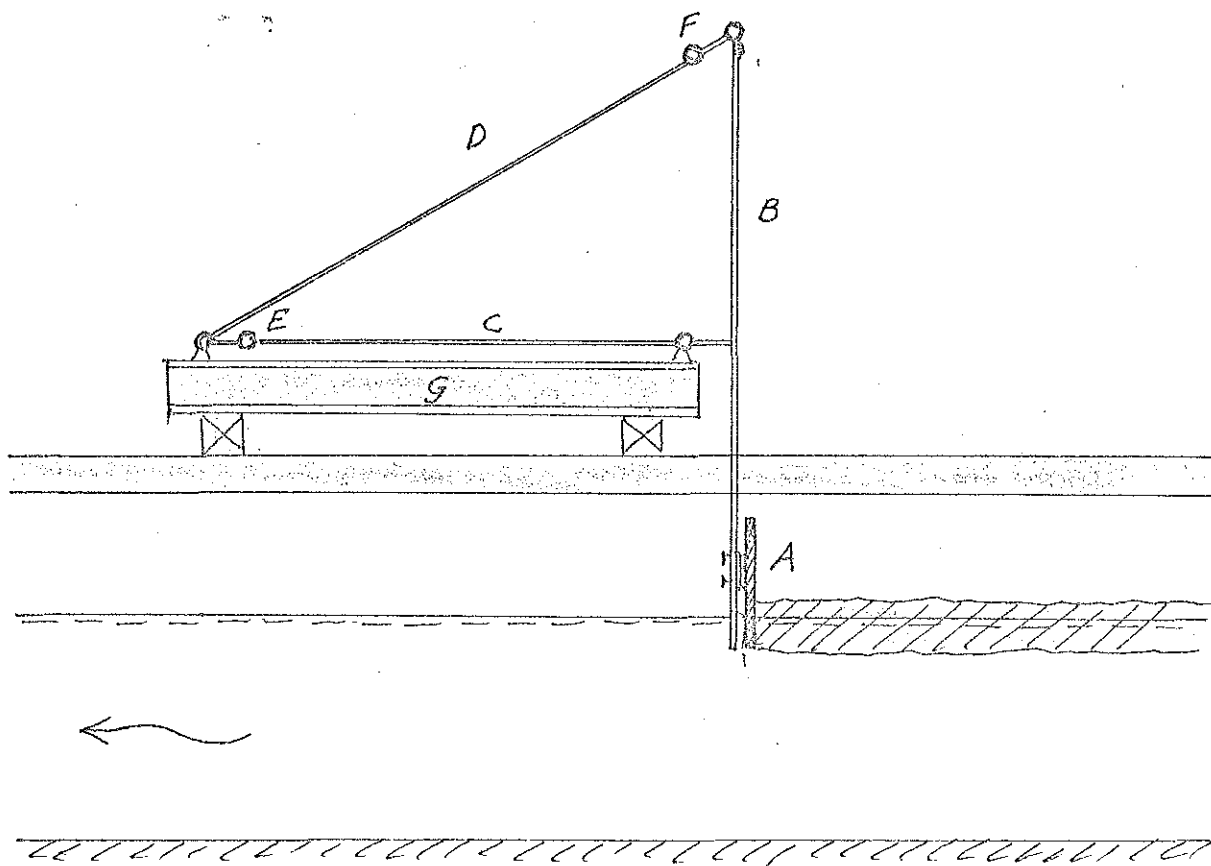
Försöken utfördes i en av Vattenbyggnadsinstitutionens rännor. Den har rektangulär tvärsektion, 60 x 100 cm. Rännans längd är 10 m. Dess väggar är av glas och botten av plåt. Vattnet leds ned i rännan via ett mätöverfall av Thomsons typ, med vars hjälp det tillförda flödet kan mätas. Största flöde som kan tillföras rännan är ca 150 l/s. Flödet kan regleras med en elmanövrerad ventil. I rännans nederände finns ett bräddavlopp och framför detta ett spjäll med vilket avbördningen kan regleras.

För uppmätning av vattenhastigheten användes en givare av propellertyp, en s k flygel. Flygeln kopplades till ett räkneverk, som registrerade propellerns varvtal.

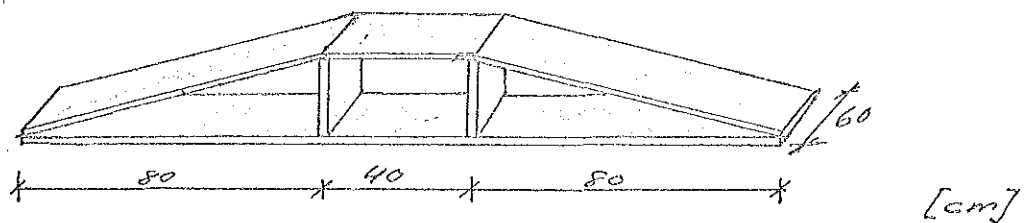
För simulering av isbröte användes en stor mängd klotsar av furu med måtten 5 x 5 x 1 cm. Klotsarna stoppades upp 2 m uppströms bräddavloppet av en höj- och sänkbar kryssfanérskiva, A (se figur 3.1) med måtten 60 x 40 cm. Denna skiva, kallad länsa, är fästad i en rigg för kraftmätning, bestående av 3 stänger B, C, D och 2 kraftgivare E och F. Riggens är monterad på en balk G som vilar på 2 regler.

Kraften mot länsan uppmättes av en givare E. Denna var kopplad via en mätbrygga till en skrivare som registrerade kraften. (Givare F mätte kraften i stång D, vilket gav vertikalkraften mot länsan. Denna kraft var ointressant i våra försök och registrerades ej.)

För att kunna ändra sektionens bredd eller höja botten på en kortare sträcka användes en "låda" av kryssfanér (se figur 3.2). Dess höjd y kunde varieras genom en enklare ombyggnad. Lådan kunde antingen läggas ned mot botten eller ställas mot ena väggen. Lådan placerades cirka 2 meter uppströms länsan.



Figur 3.1. Principiellt utseende av mätrigg med länsa.



Figur 3.2 Skiss över den låda som används för att minska djup eller bredd.

4. FÖRSÖKENS UTFÖRANDE

4.1 Kalibrering av kraftgivare

Kraftmätningssystemet monterades vid en vertikal pelare så att länsan hamnade i horisontalläge. Länsan belastades med vikter om 0,5 - 5 kg. En mätbrygga och skrivare kopplades till kraftgivaren och kalibrerades med hjälp av ett decadmotstånd, så att önskat mätområde erhöles på skrivaren. Nollpunkten justerades in vid avlastning av länsan. Givarens linearitet kontrollerades vid belastningen med vikterna. Samtidigt kontrollerades att friktionen i lederna inte gav för stora restkrafter efter avlastning.

4.2 Densitetsmätning

Densitetsmätningen utfördes dels på torra klotsar och dels på klotsar som hade legat i vatten ett dygn. Till mätningarna användes cirka 25 klotsar vid vardera mätningen. Klotsarnas volym bestämdes genom nedsänkning i ett 1.000 ml:s mätglas. Klotsarnas vikt bestämdes genom vägning både före och efter volymmätningen för att på så sätt erhålla en kontroll på om klotsarna uppvisar en omedelbar vattenuppsugning.

4.3 Kontroll av vattenhastighetens variation över ett rektangulärt tvärsnitt.

Vattenhastigheten mättes i 9 punkter, jämnt fördelade över tvärsnittet, med en flygel vid ett enstaka tillfälle. Mätningarna gav till resultat att hastigheten varierade ett par procent inom tvärsnittet. Största hastigheten noterades snett nedanför tvärsnittets centrum. Detta kan bero på att vattnet fördelades ojämnt vid inströmningen i rännan. Vid studium av klotsarnas färdväg iaktogs att dessa drar sig ut mot ena väggen, vilket verifierar ovanstående antagande.

4.4 Verifiering av tillväxtteorin

Dessa försök utfördes med konstant tvärsektion längs hela rännan.

Önskat vattendjup och vattenhastighet ställdes in med hjälp av ventilen vid tillflödet och spjället i rännans nedströmsände. Länsan sänktes ned i vattnet några centimeter. Skrivaren nollställdes så att den av vattenflödet uppkomna kraften inte registrerades.

Sedan dessa instrument ställts in släpptes klotsarna i en jämn ström i rännans uppströmsände och drev ned mot länsan där de stoppades upp av denna. När ett tillräckligt långt täcke av klotsar hade byggts upp, mättes dess tjocklek.

Därefter sänktes flygeln ned och vattenhastigheten mättes. Även vattendjupet mättes.

Med kännedom om vattendjup, rännans bredd och flöde erhöles ett medelvärde på hastigheten över hela sektionen, beräknad på tvärsektionens yta.

Under försökets gång registrerade skrivaren den mot länsan uppkomna kraften.

Med olika vattendjup och vattenhastigheter utfördes på detta sätt ett 20-tal försök.

4.5 Variabel sektion, liggande låda.

Den tidigare beskrivna lådan lades ned på rännans botten, ca 1,25 m uppströms länsan (se figur 4.1). På detta sätt erhöles ett minskat vattendjup över lådan. Vattenhastigheten mättes med flygel på två ställen, dels över lådans mittpunkt och dels 2 meter uppströms denna. Dessa mätningar gjordes efter det att täcket av klotsar hade byggts upp.

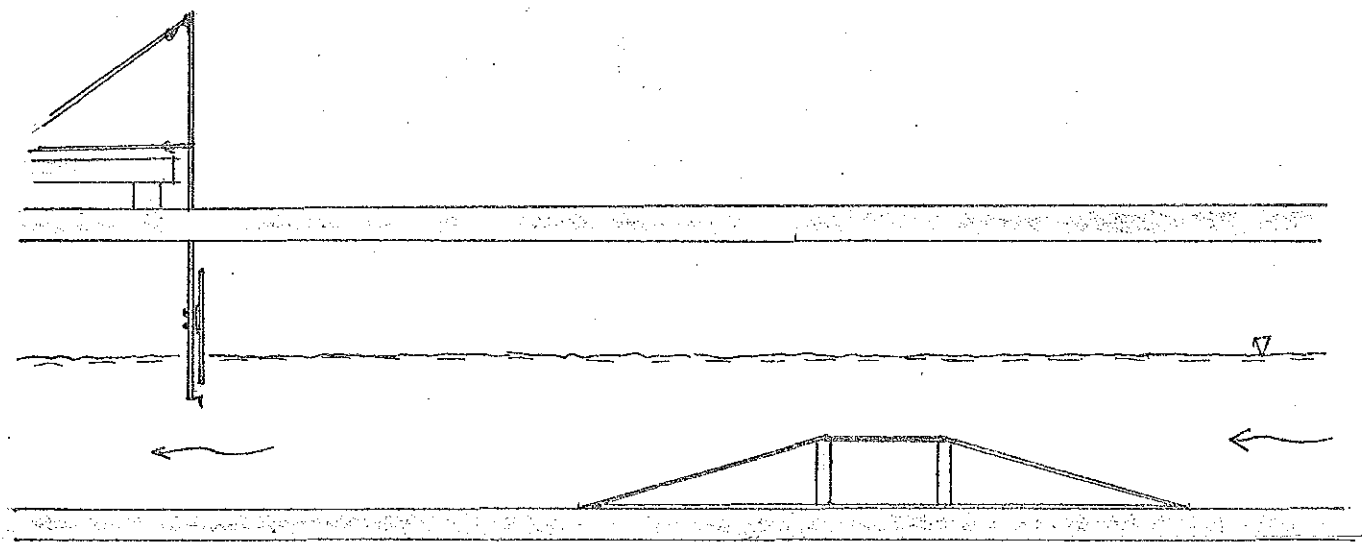
Eftersom täckets tjocklek och även vattenytans nivå över rännans botten visade sig variera i längdriktningen, uppmättes dessa värden i ett antal punkter med 25 cm mellanrum.

I övrigt genomfördes 15 försök enligt "inledande försök" i kapitel 4.4.

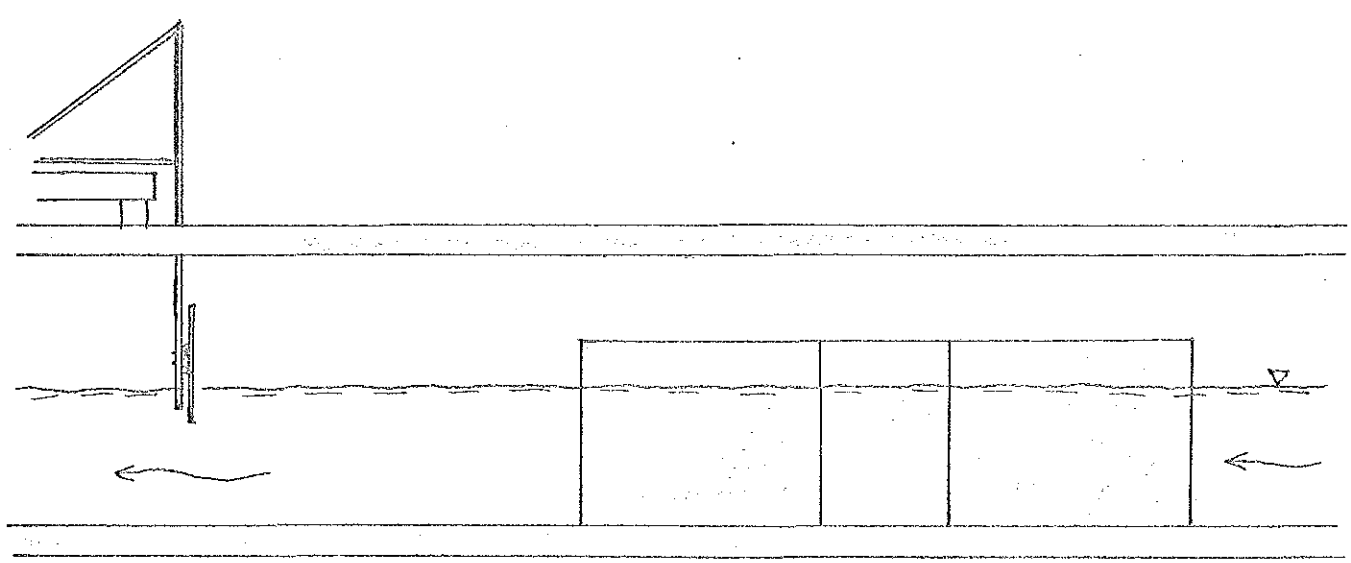
4.6 Variabel sektion, stående låda.

Lådan ställdes i dessa försök på högkant med sin botten mot rännans ena vägg (se figur 4.2). På detta sätt erhöles en minskad bredd av sektionen vid lådan. I den smalaste sektionen var bredden i de 3 fallen 37,5 cm, 27,5 cm respektive 20 cm.

I övrigt genomfördes försöken enligt kapitel 4.4 och 4.5.



Figur 4. 1. Lådans placering i försöken med "liggande låda".



Figur 4. 2. Lådans placering i försöken med "stående låda".

Detta kapitel omfattar förklaringar till tabeller och i försöken uppmätta variabler. De egentliga mätresultaten redovisas inte i detta arbete, då dessa i tabellform upptar 20 sidor. Detsamma gäller för den första bearbetningen av mätvärdena, som omfattar ytterligare 10 sidor tabeller. Även dessa resultat är att betrakta som primärvärden. De mer representativa och väsentliga resultaten av de fortsatta beräkningarna redovisas i kapitel 6, "Resultat". Mätvärdena finns arkiverade hos institutionen för Vattenbyggnad CTH, och kan erhållas därifrån.

5.1 Verifiering av tillväxtteorin.

Under försökens utförande tabellfördes ett antal variabler, som enligt förutsättningarna och de teoretiska förebilderna kunde vara intressanta. Följande variabler tabellerades:

Vattenflödet Q , som mättes i tilloppet.

Vattendjupet H , som mättes efter klotstäckets bildande.

Flygelns varvtal n , som ger vattenhastigheten.

Klotstäckets tjocklek t .

Klotstäckets längd L ,

Kraften P mot länsan, registrerades kontinuerligt med hjälp av skrivaren.

Klotstäckets längd l har inte mätts i de resterande försöken och inte använts i några beräkningar. Se figur 0.1.

5.2 Variabel sektion, liggande låda.

I dessa försök mättes två variabler i sektioner med 25 cm mellanrum mellan länsan och lådans uppströmsände (sektion 0 - 350). De två variablerna t_u , klotstäckets tjocklek under vattenytan, och H , vattendjupet mättes efter det att hela bröten bildats. Vattenhastigheten mättes på två ställen med flyglar, dels ovanför lådans mittpunkt och dels uppströms lådan. Varvtalet på de två flyglarna registrerades som u_1 och u_2 . I övrigt mättes vattenflödet Q och kraften mot länsan, P , på samma sätt som i tidigare försök. Se figur 0.1.

5.3 Variabel sektion, stående låda.

Samma mätningar som i kapitel 5.2 utfördes i denna försöksserie. Bredden i förträngningen ändrades i 3 omgångar, vilket inte påverkade mätningssättet, men däremot de efterföljande beräkningarna.

Vattendjupet H och klotstäckets tjocklek under vattenytan t_u mättes var 25:e cm uppströms länsan. Flygelvarvtalet mättes på 2 ställen, u_1 och u_2 , vattenflödet Q och kraften P mot länsan mättes som tidigare. En elevations- och en planskiss över försöksanordningen med mätställen visas i figur 0.2.

5.4 Mätproblem.

5.4.1 Flödet Q .

Luft i tilloppsröret gjorde att flödet varierade något under försökens gång även om ventilens öppningsgrad ej ändrades. Eftersom dock vattnet rann ut i rännan via en bassäng med ett Thomson-överfall (där mätningen av flödet sker) dämpades fluktuationerna och ett ganska säkert värde på flödet kunde mätas. Vid mycket stora flöden (större än 150 l/s) var detta dock svårt att mäta på grund av mätanordningens utformning.

5.4.2 Täckets tjocklek, t .

I klotsanhopningen låg klotsarna i total oordning, varför man ej kunde mäta klotstäckets tjocklek med en större noggrannhet än cirka ± 1 cm. Vid mycket låga vattenhastigheter lade sig klotsarna kant i kant, och anhopningstjockleken blev då naturligtvis lika med klotsens tjocklek, dvs 1 cm. Någon mindre tjocklek kunde naturligtvis ej uppmätas.

6. RESULTAT

6.1 Bearbetning av mätvärden.

6.1.1 Verifiering av tillväxtteorin.

Medelhastigheten v_{med} beräknades genom att dividera vattenflödet Q med aktuell tvärsnittsarea $A = b \cdot H$. Härur beräknades Froudes modifierade tal

$F_m = \frac{v_{\text{med}}}{\sqrt{2 g H}}$ och relativa tjockleken t/H för varje försök. Resultaten uppritades i diagram med $\frac{v}{\sqrt{2 g H}}$ som funktion av t/H . (Se figur 6. 2).

Teoretiskt beräknade kurvor ur ekv.

$$\frac{v}{\sqrt{2 g H}} = \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho} \cdot \frac{t}{H}} \left(1 - \frac{t}{H}\right)$$

med olika värden på klotstäckets täthet (Jfr. kap. 6. 2. 1). ritades in i diagrammet för jämförelse med de erhållna punkterna. Klotsarnas densitet har mätts till $560 \text{ kg/m}^3 < \rho' < 700 \text{ kg/m}^3$, se kap. 6. 2. 1.

6.1.2 Variabel sektion, liggande låda.

På samma sätt som i kapitel 6. 1. 1 beräknades v_{med} för varje sektion. Avdrag för den nedsänkta lådan gjordes då det täckande vattnet vid lådans sidor kan försummas.

För att undersöka om Parisset-Haussers tillväxtteori kunde tillämpas vid beräkning av klotstäckets tjocklek, beräknades Froudes modifierade tal för vissa kritiska sektioner. I dessa sektioner, som var lådans mitt, sektionen för största tjocklek på bröten, och sektionen för fritt vatten uppströms bröten, jämfördes F_m med t/H i de tre sektionerna. Något entydigt samband eller några klara avgränsningar stod inte att finna i dessa beräkningar, varför de utelämnas i fortsättningen.

En jämförelse gjordes mellan försök dels med samma ursprungliga vattendjup, H_{00} , och dels med samma ursprungliga vattenhastighet, v_{00} . Index 00 avser sektion 00, dvs vid lådan. För dessa försök undersöktes huruvida den maximala tjockleken t_{max} och dess läge i förhållande till lådan påverkades av den variabel som inte var gemensam. Försök med gemensamt vattendjup H_{00} undersöktes med avseende på v_{00} , medan försök med gemensam hastighet

undersöktes med avseende på H_{00} .

Vidare beräknades F_m och t/h i varje snitt för ett begränsat antal försök. I dessa beräkningar användes olika värden på H , dels H_{aktuellt} med vilket menas $h + t_u$ som mätts i respektive snitt efter klotstäckets bildande, och dels H_{350} som anger det H som uppmättes i sektion 350 efter täckets bildande. Detta H_{350} motsvarar det högsta H som kan existera då täckets kant växer till i respektive sektion. Dessutom beräknades t med två olika tätheter på klotsarna, nämligen $\rho' = 600$ och $\rho' = 700$. Totalt beräknades fyra olika t samt medelvärdet av dessa, vilka jämfördes med det experimentellt bestämda t_{exp} .

6.1.3 Variabel sektion, stående låda.

Även i dessa försök beräknades v_{med} för ett antal kritiska sektioner, och därefter beräknades F_m och t/h för dessa sektioner. Inte heller i denna försöksomgång gav dessa beräkningar några entydiga resultat som det finns anledning att redovisa.

Försök med samma ursprungliga vattendjup, H_{00} , och med samma förträngning undersöktes med avseende på hastigheten v_{00} . Dessutom jämfördes försök med samma hastighet i sektion 00, v_{00} , och med samma förträngning, och dessa undersöktes med avseende på H_{00} .

I ett begränsat antal försök beräknades F_m och t/H i varje snitt. På samma sätt som i kapitel 7.1.2 användes fyra olika H i beräkningarna och dessutom medelvärdet av dessa som jämfördes med t_{exp} .

6.1.4 Erosionsberäkning.

Utgående från den tidigare redovisade erosionsteorin gjorde vi beräkningar för att se om erosion förelåg. Vi ställde upp ett samband för den höjd över botten där erosion av vårt material borde uppstå. (Jämför det omvända förhållandet med bottenransport).

För att åskådliggöra teorin följer här ett beräkningsexempel:

Försök nr 2 den 17/2: $Q = 0,061 \text{ m}^3/\text{s}$

$$b = 0,6 \text{ m}$$

1) Gissa $h = 0,1 \text{ m}$

$$R = \frac{0,6 \cdot 0,1}{2(0,1 + 0,6)} = 0,043$$

$$\text{Ekv. (10) ger: } \frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3,72 \cdot 4R}{k_s}$$

där $k_{is} = 0,036 =$ ekvivalent sandråhet för klotsarna

$k_{bs} = 0,001 =$ ekvivalent sandråhet för botten-sidor

$$\frac{1}{\sqrt{f_{is}}} = 2 \log \frac{3,72 \cdot 0,171}{0,036} \implies f_{is} = 0,161$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{bs}}} = 2 \log \frac{3,72 \cdot 0,171}{0,001} \implies f_{bs} = 0,032$$

Den sammanvägda friktionskoefficienten för rännan och klotstäckets erhålles ur ekv. (11):

$$f_{\text{ekv}} = \frac{0,161 \cdot 0,6 + 0,032 \cdot 0,8}{1,4} = 0,087$$

Denna friktionskoefficient ger en största höjd över bottnen där erosion förekommer enligt ekv. (13):

$$h = 3,82 \cdot \frac{Q}{b} \cdot \sqrt{f} = 3,82 \cdot \frac{0,061}{0,6} \sqrt{0,087} = 0,114 \text{ m}$$

Ny gissning: $h = 0,11 \text{ mm}$.

Ger på samma sätt som ovan $h = 0,11 \text{ m}$.

För försöken med liggande låda gäller detta beräknade h längs hela rännan.

För försöken med stående låda ändras erosionshöjden h med ändrad fri bredd b vid förträngningen, enligt formeln ovan.

6.2 Resultat.

6.2.1 Densitetsmätning.

Densitetsmätningen utfördes så, att klotsarna vägdes både före och efter volymmätningen, som utfördes med klotsarna nedsänkta i vatten. Följande mätvärden erhöles:

	Vikt före volymmätning (g)	Vikt efter volymmätning (g)	Volym (ml)
Torra klotsar	290	335	600
Våta klotsar	476	490	700

Ur dessa värden beräknades fyra olika densiteter:

$$\rho'_{\text{torra klotsar}} : \text{före } 480 \text{ kg/m}^3 \quad \text{efter } 560 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho'_{\text{våta klotsar}} : \text{före } 680 \text{ kg/m}^3 \quad \text{efter } 700 \text{ kg/m}^3$$

Klotsarna suger upp en viss mängd vatten omedelbart som de släpps i rännan. Därför kan densiteten för helt torra klotsar (480 kg/m^3) anses vara irrelevant. Klotsarnas densitet varierar alltså mellan 560 och 700 kg/m^3 .

Generellt gäller att klotsarna i början av varje försöksomgång har en mindre densitet än i slutet, eftersom klotsarna suger upp vatten under försökens gång.

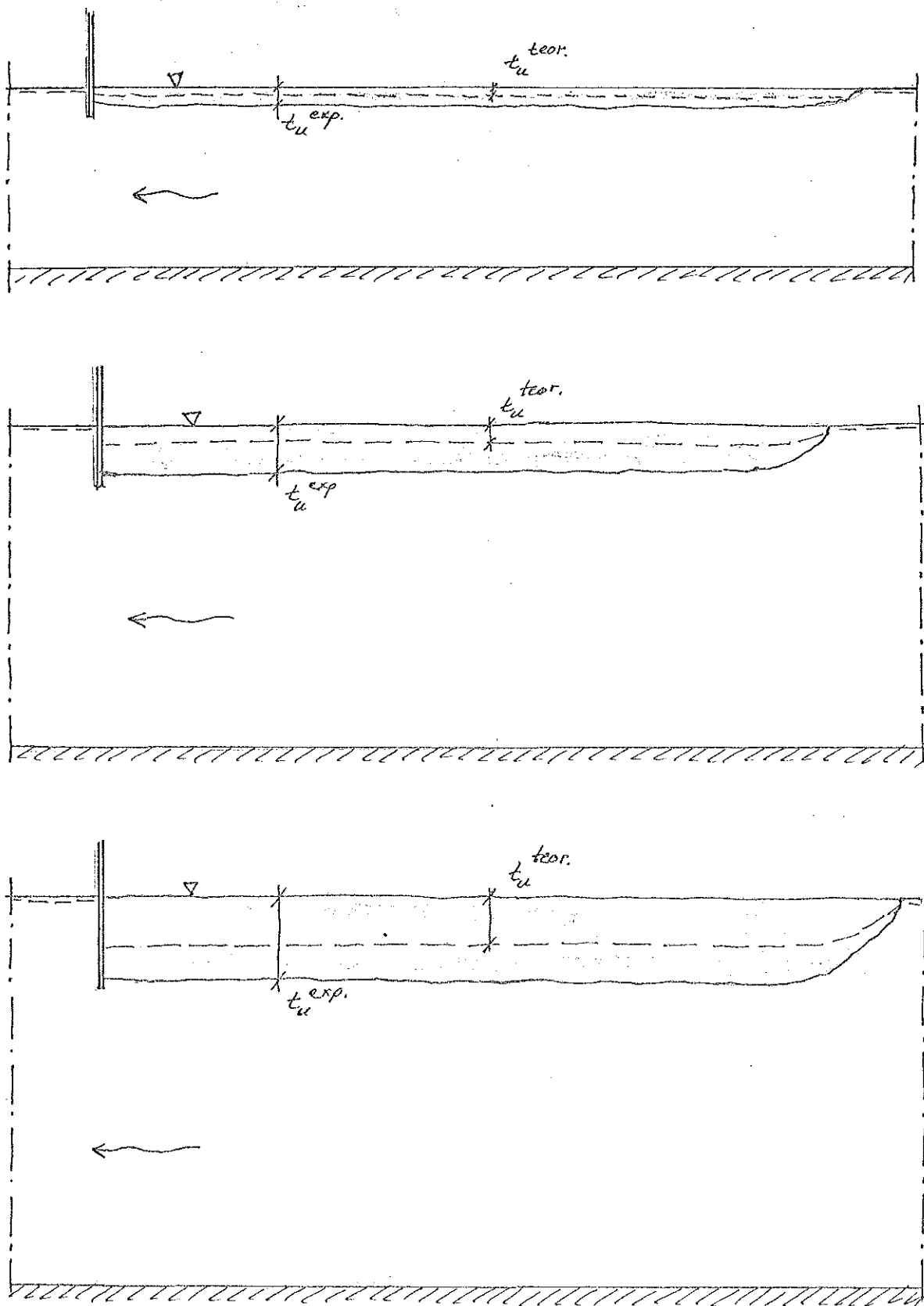
6. 2. 2 Verifiering av tillväxtteorin.

I denna försöksomgång bildades ett jämntjockt täcke som växte mot strömmen så länge klotsar slängdes i. Täckets utseende i tre försök visas i figur 6. 1. Den teoretiska tjockleken som skulle erhållits med $\rho' = 650$ finns även inritad.

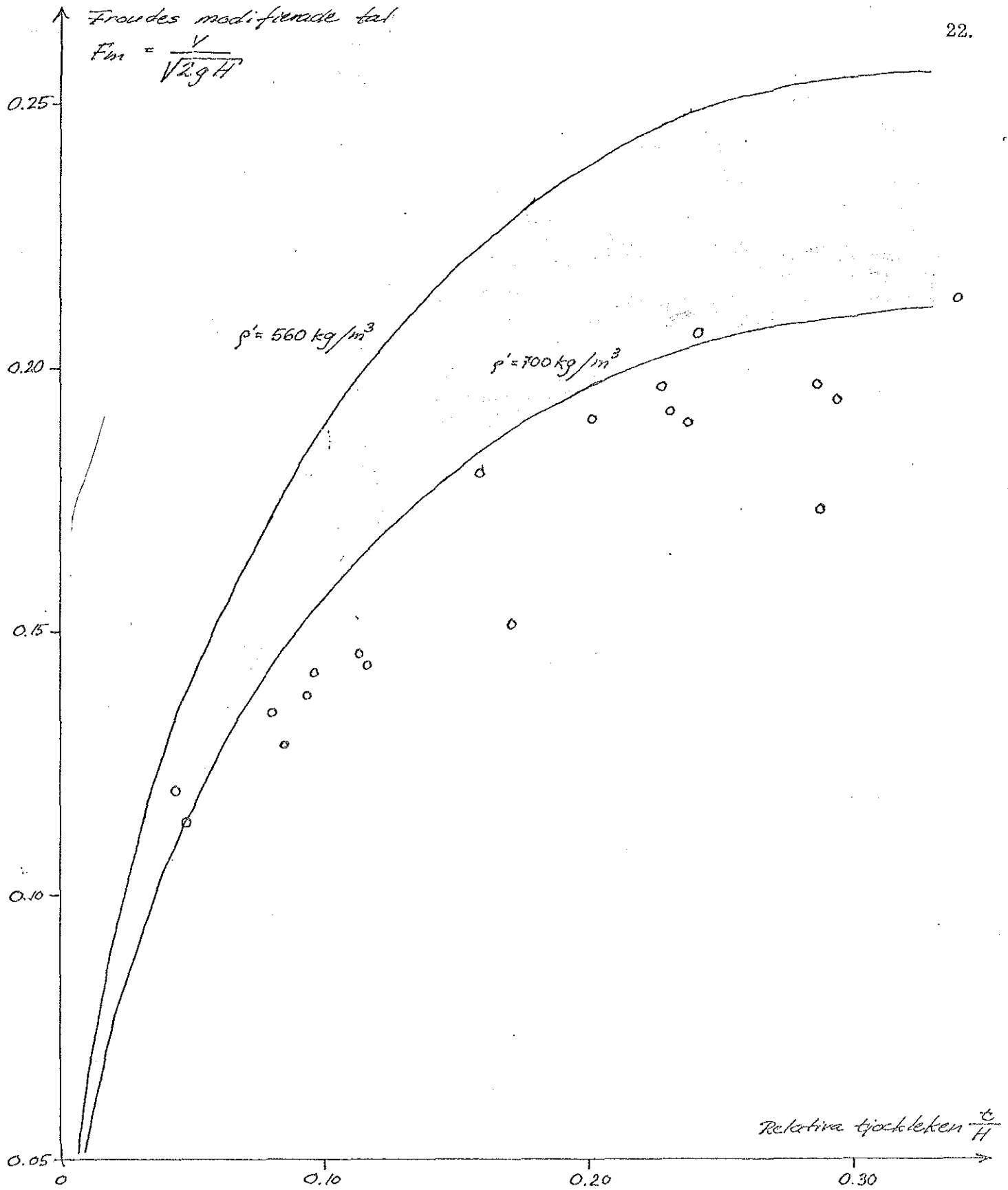
Vid mycket låga hastigheter lade sig klotsarna kant i kant flytande på vattenytan. Vid högre hastigheter pressades en del klotsar ned under vattenytan och en bröte bildades och klotsarna lade sig i total oordning. Fortfarande växte dock bröten till med konstant tjocklek. Täckets tjocklek t visade sig öka med ökad vattenhastighet v och med minskat vattendjup H .

De beräknade värdena på t/H och $\frac{v}{\sqrt{2gH}}$ för varje försök lades in i ett diagram där två teoretiska kurvor enligt tillväxtteorin var inritade. En kurva där $\rho' = 560 \text{ kg/m}^3$ och en där $\rho' = 700 \text{ kg/m}^3$, eftersom klotsarnas densitet varierade mellan dessa värden. Resultat visas i figur 6. 2.

I stora drag följer våra experimentella värden en linje som ligger strax under de teoretiska kurvorna i figuren.



Figur 6.1. Exempel på täckets verkliga tjocklek jämfört med den teoretiska.



Figur 6.2. Samband mellan Froudes modifierade tal F_m och relativa tjockleken t/H .

Skuggat område = teoretiskt samband

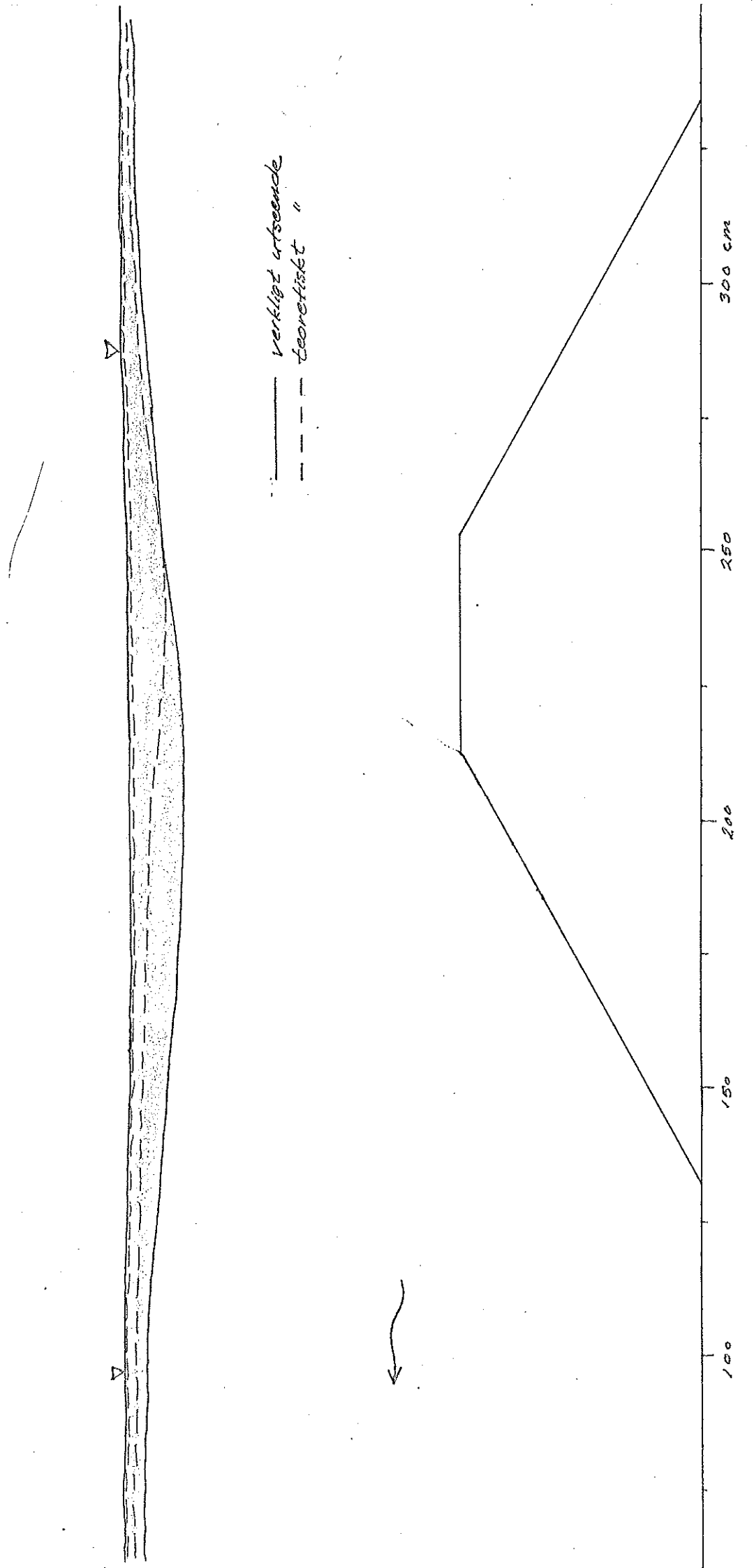
Cirklar = erhållet resultat

6.2.3 Variabel sektion, liggande låda.

Klotsarna bildade i dessa försök ett täcke med varierande tjocklek t . I området mellan lådans mittpunkt och dess nedströmsände ($x = 125 - 225$) följde klotstäckets undersida i stort sett variationerna i bottenytan. De beräknade värdena på t_u jämförda med $t_{u\text{exp}}$ finns inritade i figur 6.3 - 6.5. Figurerna omfattar sektion 100 - 350 och har överdriven höjdskala.

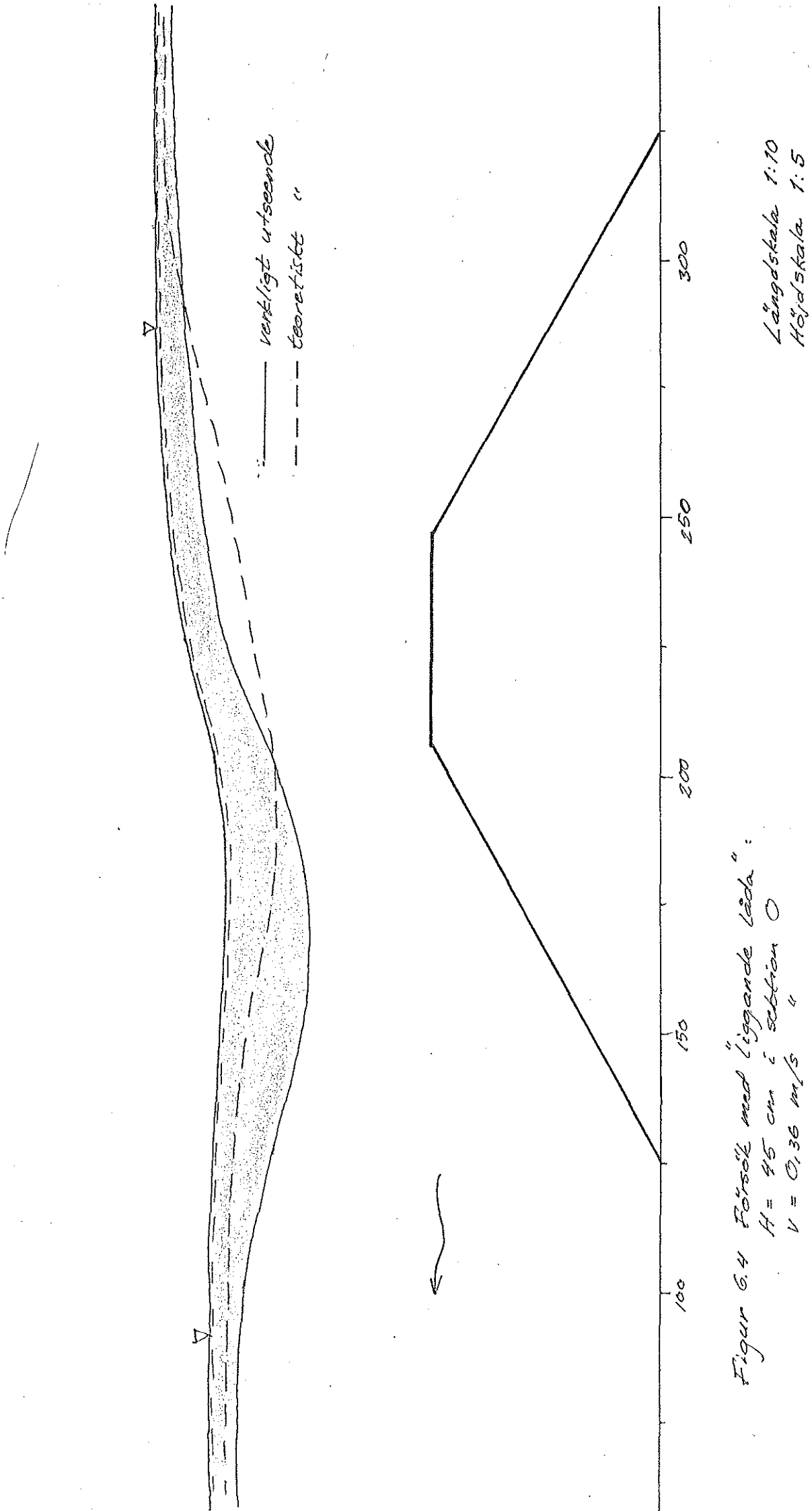
De ur dessa figurer utlästa resultaten visade att ingen av de beräknade tjocklekarna t_{teor} stämde överens med t_{exp} längs hela täcket, d v s tillväxtteorin stämmer dåligt. Den teoretiskt beräknade tjockleken t_{teor} skär den experimentellt bestämda linjen på två ställen, kallade skärningspunkt 1 och 2. I de olika områdena kring skärningspunkterna kunde följande utläsas: Nedströms punkt 1 ger samtliga teorier för låga t jämfört med det verkliga t_{exp} . I intervallet punkt 1-2 ger samtliga teorier för höga t , men t beräknat på $\rho' = 600$ ger bästa resultatet. I detta intervall är hastigheten ofta så hög att det maximala värdet på F_m överskrids, speciellt för $\rho' = 700 \text{ kg/m}^3$. Förutsättningarna för erosion är dessutom störst i detta intervall (se kapitel 7.2.5), varför resultaten får anses vara något osäkra. Uppströms punkt 2 stämmer t beräknat på H_{350} för $\rho' = 700 \text{ kg/m}^3$ bäst överens med det experimentellt bestämda t .

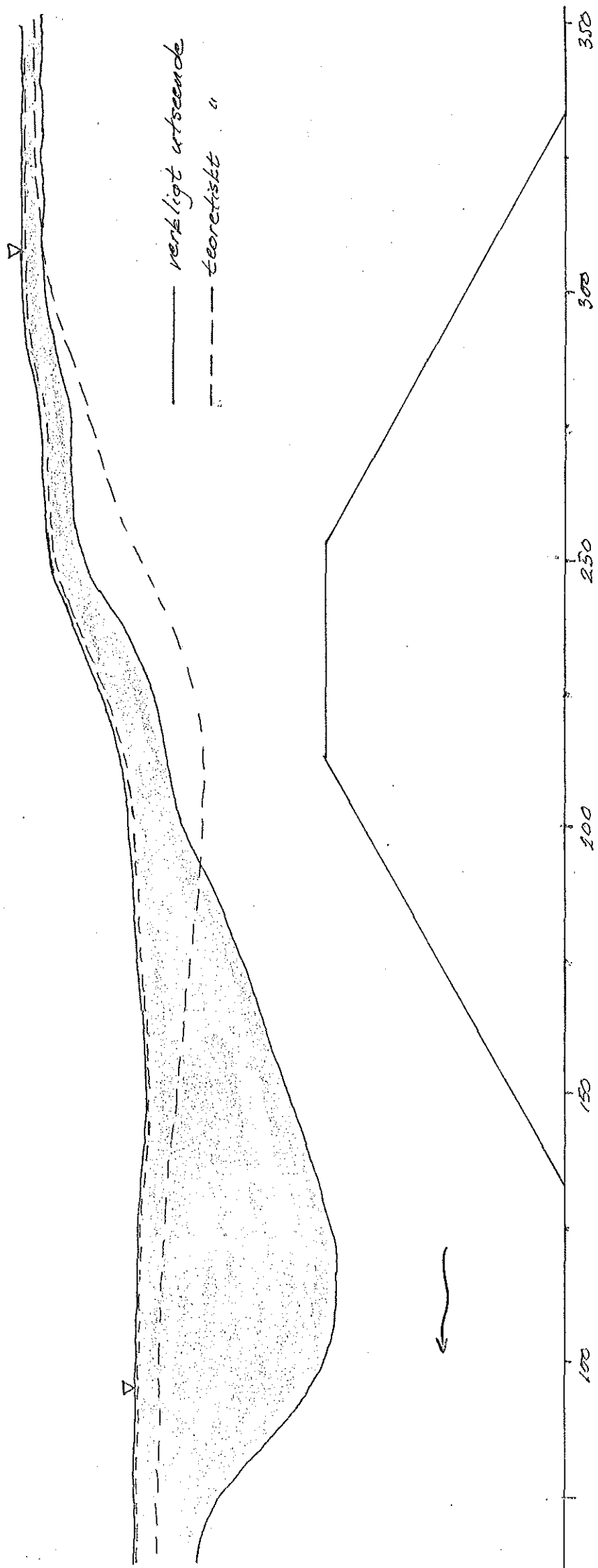
Undersökningen av vattenhastighetens och vattendjupets inverkan på klotstäckets maximala tjocklek gav följande resultat. För försök med samma vattendjup i sektion 00 ökar täckets tjocklek med ökad hastighet samtidigt som läget av t_{max} förskjuts nedströms. För försök med samma hastighet i sektion 00 ökar täckets tjocklek med minskat vattendjup samtidigt som läget av t_{max} förskjutes nedströms. Resultaten illustreras i figur 6.8 och 6.9.



Figur 6.3 Försök med "liggande ledar":
 $H = 53 \text{ cm}$ i sektion 0
 $V = 0,29 \text{ m/s}$ "

Längdskala 1:10
Höjdskala 1:5



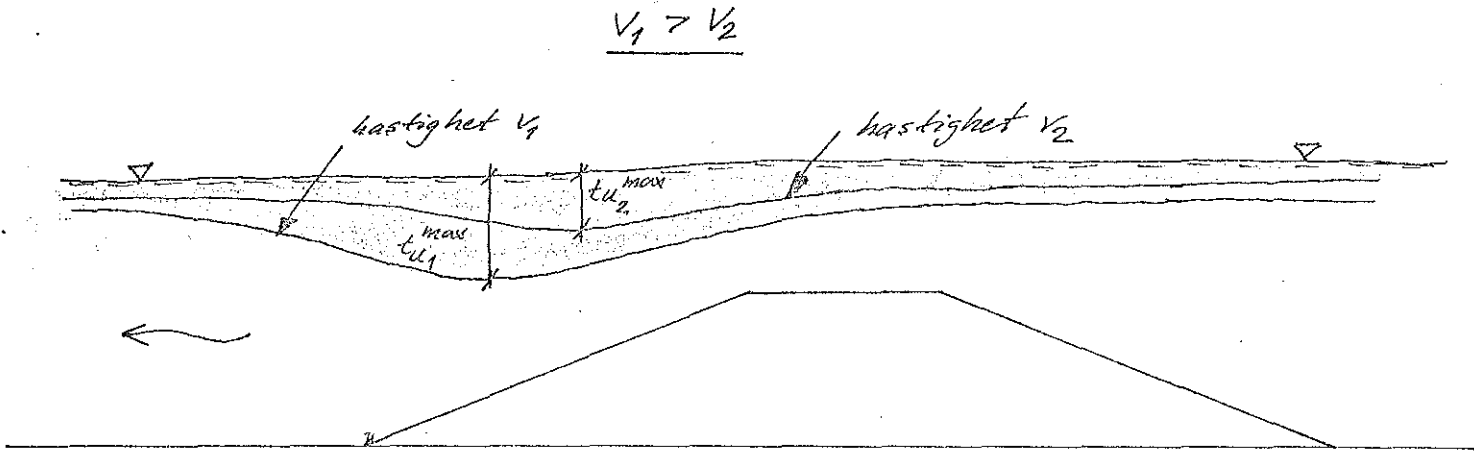


Figur 6.5 Försök med "Liggande lada":

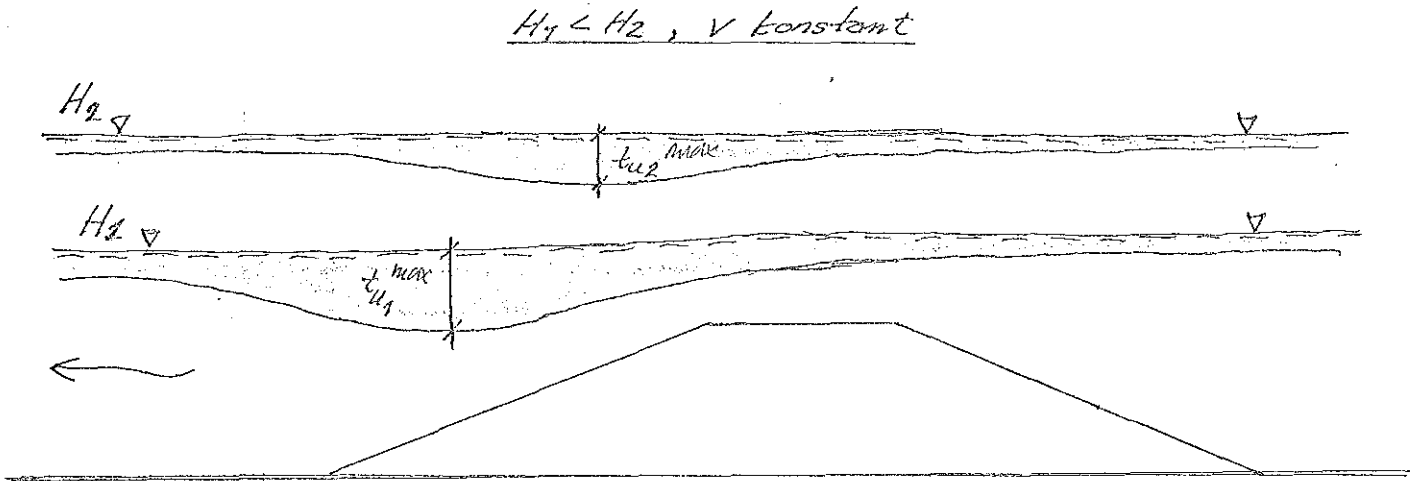
$H = 42$ cm i sektion 0

$V = 0.90$ m/s "

Längdskala 1:10
Höjdskala 1:5



Figur 6.6. Klotstäckets tjocklek och form då vattenhastigheten varierar och vattendjupet är konstant.

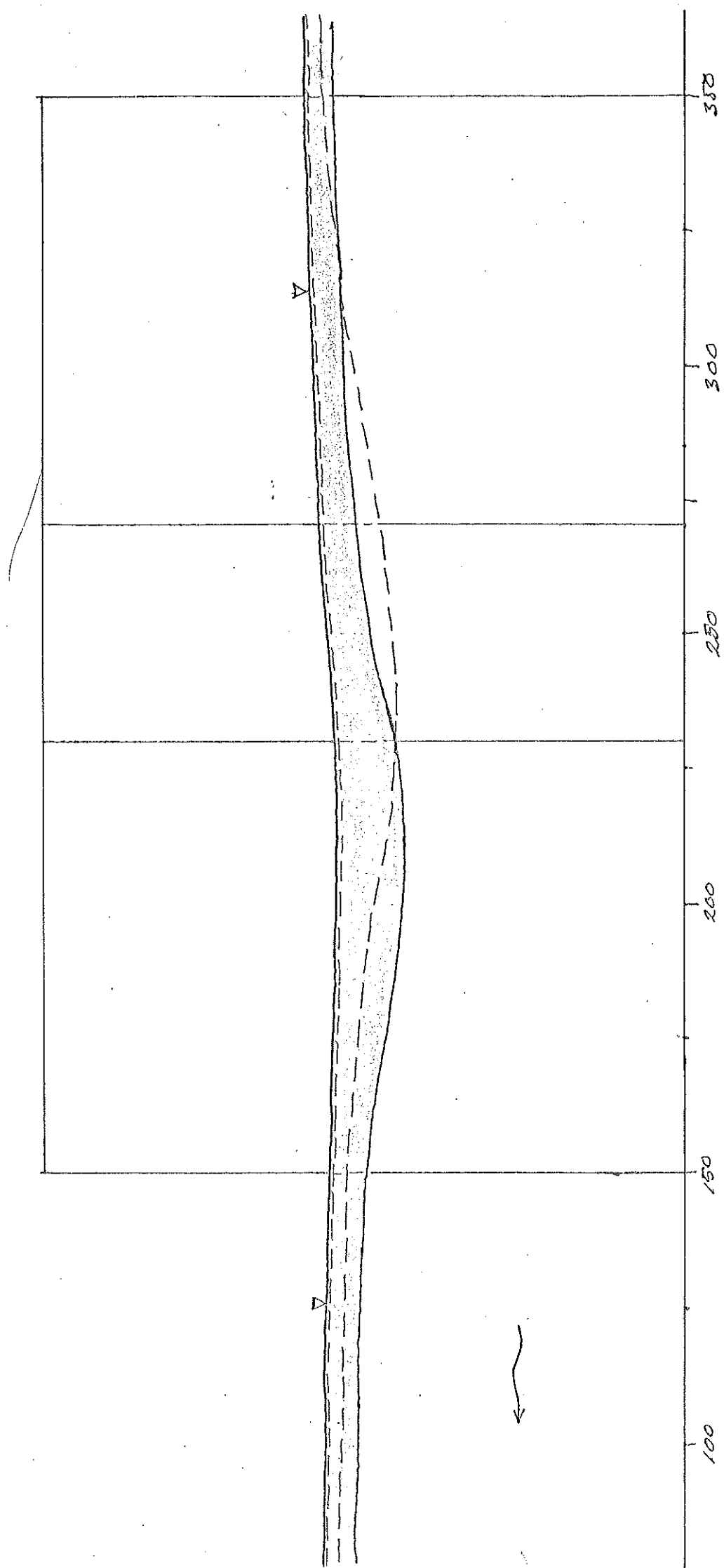


Figur 6.7. Klotstäckets tjocklek och form då vattendjupet varierar och vattenhastigheten är konstant.

6.2.4 Variabel sektion, stående låda.

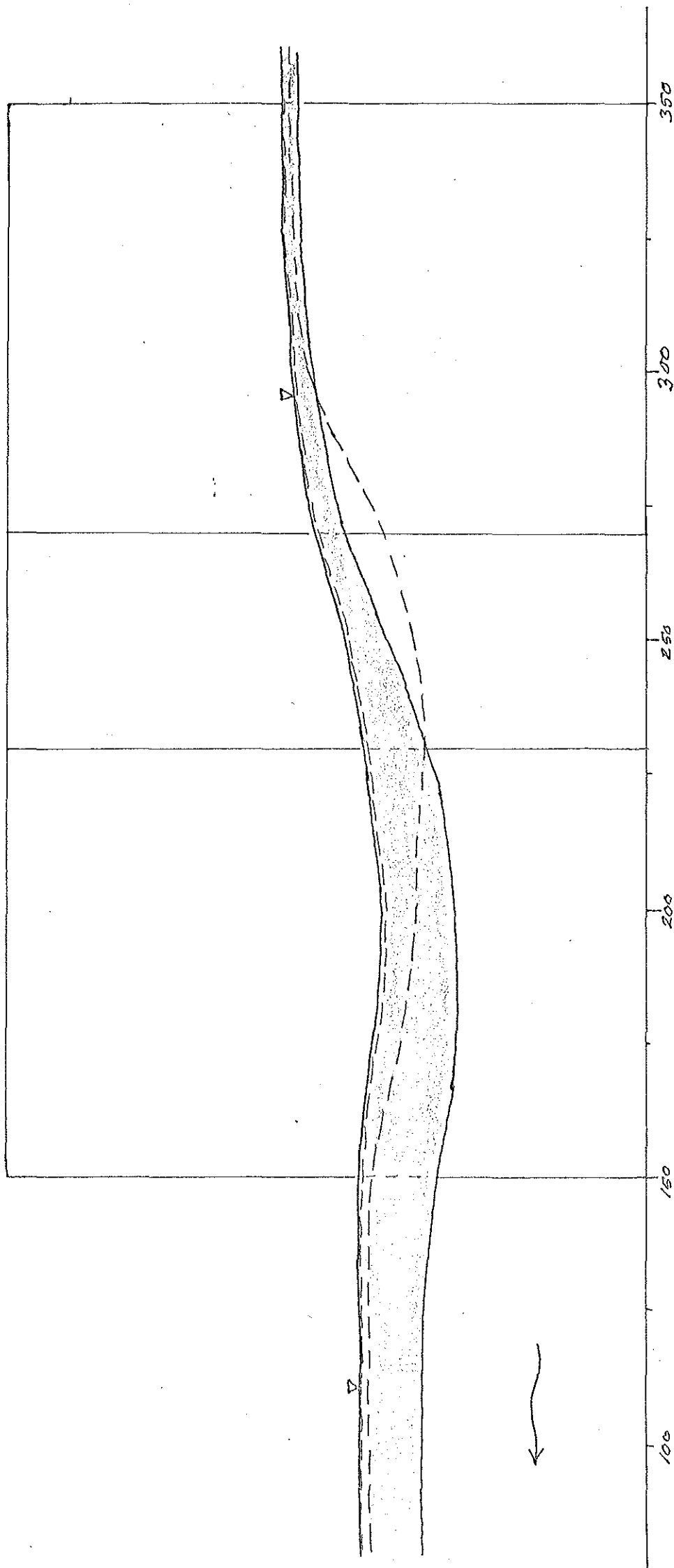
Även i dessa försök bildades ett klotstäcke med varierande tjocklek t . Dess utseende liknar resultaten för stående låda, där täcket i stort sett följer lådan ovanför dess nedströms del. Även jämförelserna mellan t_{exp} och olika beräknade t ger samma resultat som i kapitel 7.2.3. Det bör nämnas att i dessa försök erhålles en mycket stor avsänkning av vattenytan vid den största förträngningen. Figurerna nedan visar en jämförelse mellan t_{exp} och t_{ber} i tre försök med olika förträngning.

Undersökningen av vattenhastighetens och vattenhöjdens inverkan på klotstäckets maximala tjocklek gav ett liknande resultat som i kapitel 6.2.3. Få försök med samma förträngning gav få jämförelser och ett osäkert resultat.



Figur 6.8 Försök med "stånade läda":
 $H = 34$ cm i sektion 0
 $V = 0,37$ m/s "
 $b_{min} = 37,5$ cm (sektion 250)

Längdskala 1:10
 Höjdskala 1:5



Figur 6.9 Försök med "stående löda":

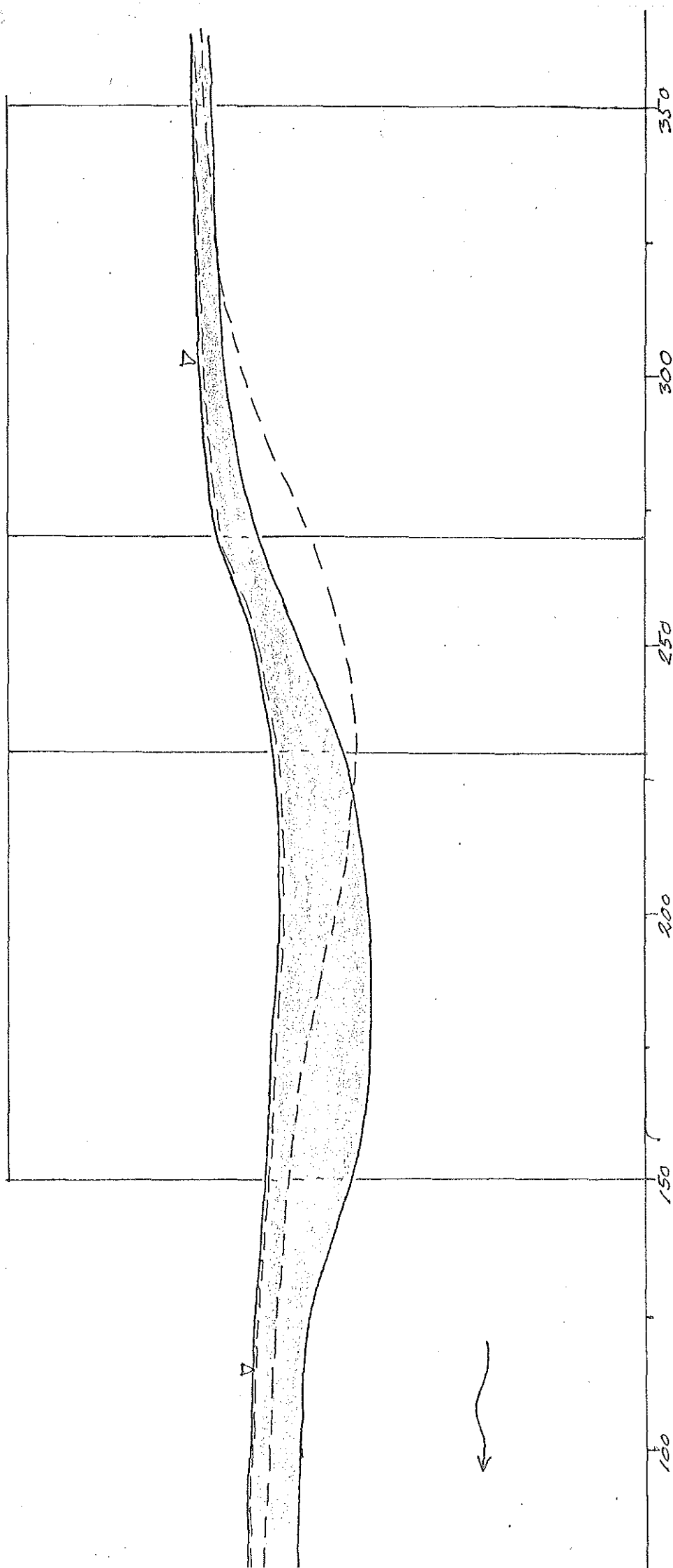
$H = 28 \text{ cm}$ i sektion 0

$V = 0,27 \text{ m/s}$ "

$b_{\text{min}} = 20 \text{ cm}$ (sektion 250)

Längdskala 1:10

Höjdskala 1:5



Figur 6.10 Försök med "Stående lada":

$H = 38$ cm i sektion 0

$V = 0,40$ m/s "

$b_{min} = 28,5$ cm (sektion 250)

Längdskala 1:10

Höjdskala 1:5

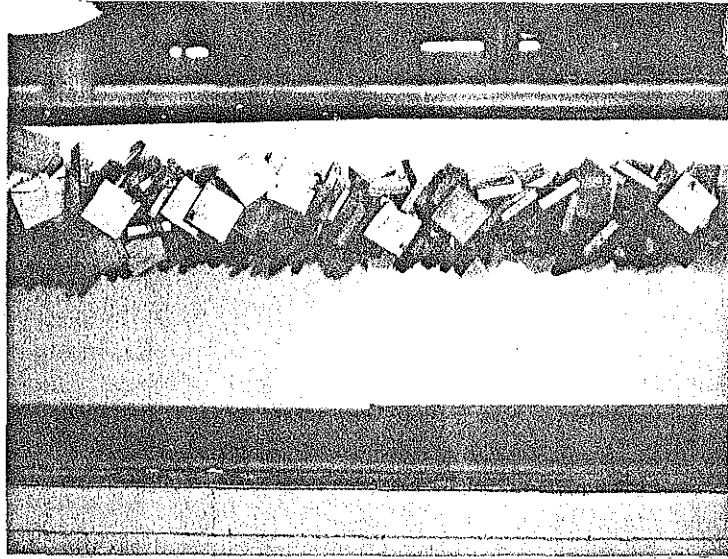
6.2.5 Erosionsberäkning.

Enligt våra beräkningar når erosionshöjden upp till klotstäckets undersida i ett flertal av våra försök. För försöken med liggande låda gäller detta i 75% av försöken, medan det för försöken med stående låda endast gäller hälften. I samtliga fall gäller detta endast i den trånga sektionen, och i ett mycket litet avsnitt i denna.

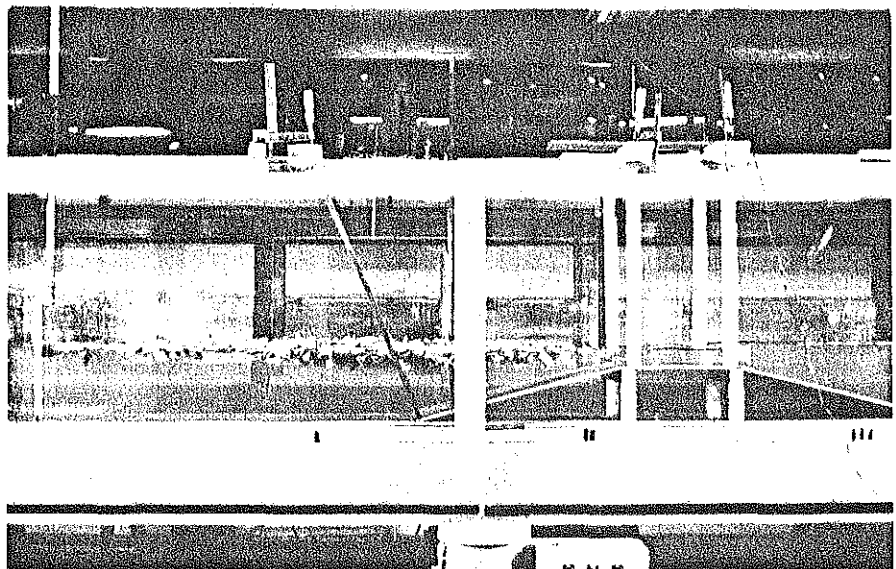
I sektion 225, som utgör den maximala förträngningens nedströmsdel, ger tillväxtteorin och de experimentella värdena en god överensstämmelse (2 cm noggrannhet). Erosionsteorin ger också god överensstämmelse i många försök (se ovan), och i övriga försök erhålls de bästa resultaten i denna sektion. Denna sektion tycks vara en "bestämmande" sektion.

En jämförelse mellan teoretiskt beräknade höjder under klotstället, h , dels enligt tillväxtteorin och dels enligt erosionsteorin visar att $h_{\text{ero}} \leq 0,02 \text{ m} + h_{\text{tillväxt}}$ i samtliga fall. I 90% av försöken är $h_{\text{ero}} \leq h_{\text{tillväxt}}$. Man kan alltså utläsa att erosionen inte motsäger eller inkräktar på tillväxtteorin.

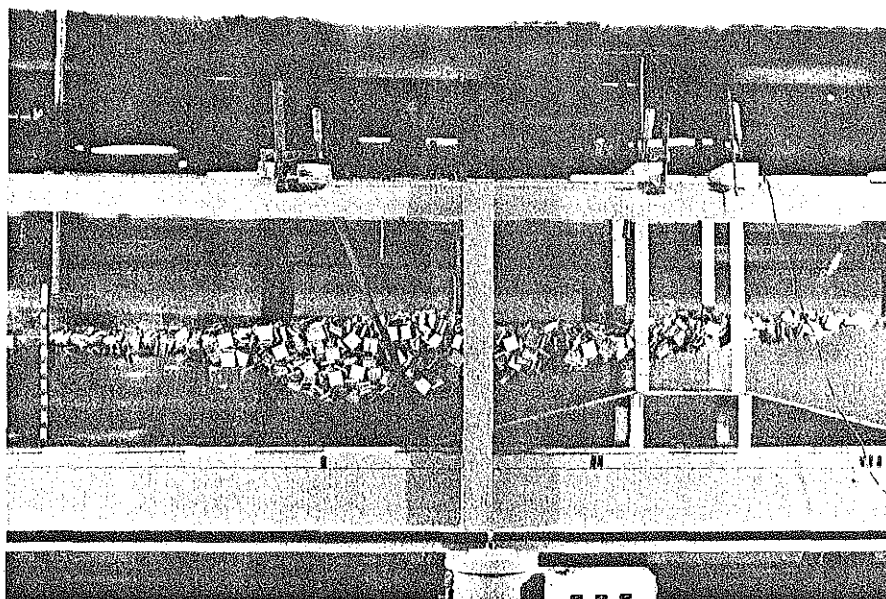
Denna avvikelse kan också beskrivas på följande sätt: Froudes modifierade tal F_m beräknas för ett försök, med de experimentellt bestämda värdena på v och H . Med ett värde på $\rho' = 630 \text{ kg/m}^3$ erhålles ur diagram, figur 6.2, ett värde på t/H , som sedan ger en teoretisk tjocklek på klotstället. Denna tjocklek t_{teor} blir konsekvent mindre än den experimentellt bestämda t_{exp} i respektive försök. Detta resultat är intressant vid diskussionerna kring de efterföljande försöken.



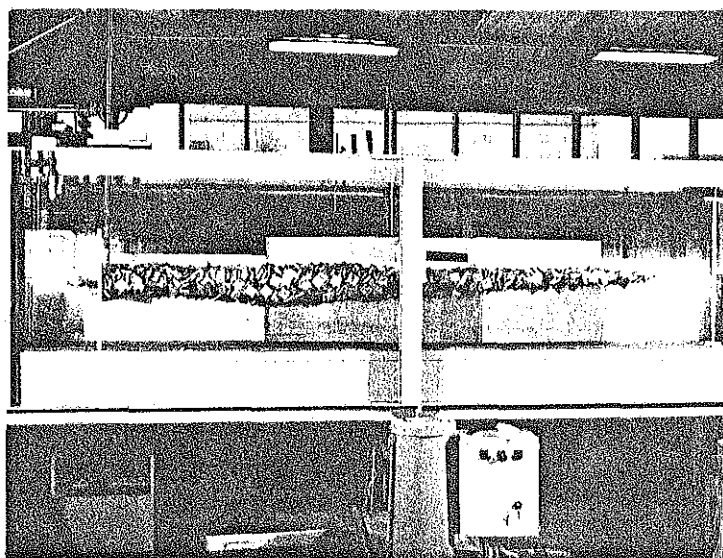
Figur 6.11. Vid försök utan "låda" (konstant sektion) bildas ett jämntjockt klotstäcke.



Figur 6.12. Försök med "liggande låda". Låg vattenhastighet, litet vattendjup. Klotstäckets har ännu ej avancerat förbi lådan.



Figur 6.13. Försök med "liggande låda". Mycket hög vattenhastighet, måttligt vattendjup.



Figur 6.14. Försök med "stående låda". Hög vattenhastighet, måttligt vattendjup.

7.1. Verifiering av tillväxtteorin.

Våra försök med konstant tvärsektion har visat att Parisset-Haussers tillväxtteori gäller även i vår försöksanläggning. Någon exakt överensstämmelse mellan teori och försök går emellertid inte att uppnå, speciellt inte i närheten av max. värdet på Froudes tal, där t/H är 0,33. Även i Parisset-Haussers egna verifikationsförsök finns denna tendens till sämre resultat ju närmare maximum försöken ligger.

En väsentlig faktor för resultaten är klotstäckets densitet. Denna varierar enligt vår densitetsmätning från 560 kg/m^3 till 700 kg/m^3 , och ett medelvärde på 630 kg/m^3 skulle här ge en teoretisk kurva som stämmer ganska dåligt med de gjorda försöken. De flesta försöken korresponderar mot ett $\rho' > 700 \text{ kg/m}^3$. Ett fiktivt $\rho' = 750 \text{ kg/m}^3$ skulle ge god överensstämmelse mellan teori och försök vad avser F_m som funktion av t/H . Ett så högt ρ' kan däremot inte utläsas ur vår densitetsmätning och motsäges av vissa resultat i försöken med variabel sektion.

7.2. Variabel sektion, liggande låda.

I dessa försök med en variabel tvärsektion är sambandet med Parisset-Haussers tillväxtteori inte lika tydligt. Mellan sektion 0 och skärningspunkt 1 (se kap. 6.2.3) erhålles ett för tjockt klotstäcke i experimenten. I avsnittet mellan punkt 1 och 2 erhålles ett alltför tunt klotstäcke jämfört med det teoretiskt beräknade. För delen uppströms punkt 2 är avvikelserna av samma slag och storlek som i verifikationsförsöken, dvs den experimentella tjockleken överstiger den teoretiska, beräknad med ett $\rho' = 630 \text{ kg/m}^3$. Slutsatsen blir att inom detta område överensstämmer dessa försök med Parisset-Haussers teori dåligt. Inte heller erosionsteorin kan förklara det tunna klotstäcke, som bildas i detta avsnitt enligt våra beräkningar. Två förklaringar är då tänkbara till denna avvikelse:

1. Vi har observerat i våra försök att vattenytan vid klotstäckets uppbyggnad i detta avsnitt stiger allt eftersom täcket framskrider. Dvs att den ursprungliga vattenhöjden h är lägre vid täckets tillväxt än vad vi har mätt upp efter täckets bildande och som vi har använt vid våra beräkningar. Eftersom t/H i detta

intervall ligger nära maximum = $1/3$, medför ett lägre H att t/H fortfarande är maximalt = $1/3$, medan det beräknade $t = \frac{1}{3} \cdot H$ blir lägre. Vi skulle alltså få ett t_{ber} som stämmer bättre överens med det verkliga t i experimenten. Tendensen att vi inom detta intervall har ett mycket högt $\frac{v}{\sqrt{2gH}}$, som ibland t o m överstiger det teoretiska maxvärdet för $\rho' = 600 \text{ kg/m}^3$ förstärks ytterligare enligt resonemanget ovan.

2. Vid erosionsberäkningen tas ingen hänsyn till ändringen i vattnets strömningsriktning som sker över lådan. Vid lådans uppströmsdel minskar tvärsnittet och vattenhastigheten ökar, samtidigt som vattnet pressas uppåt av lådan. Strömningsriktningen ändras här från horisontell ($//$ rännans botten) mot att vara parallell med lådans lutning. En ur erosionssynpunkt betydelsefull snett uppåtriktad ström passerar lådans mittdel. (Jämför med meanderbukter i en erosionsbenägen floddal). Vår beräknade höjd över botten inom vilken erosion förekommer av vårt material, h_{ero} , skulle med hänsyn till denna uppåström kunna ökas betydligt. Hastighetsresultanten parallellt med lådan erhåller en ökning med 4% jämfört med den horisontella hastighetsvektorn. Till denna hastighetsökning kommer effekten av den snett mot klotstäckets riktade strömlinjen, som är mycket svår att kvantifiera. Hastighetsfördelningen i detta avsnitt är i alla händelser mycket sned, och den verkliga hastigheten strax under klotstäckets kan vara avsevärt högre än den använda medelhastigheten i snittet. Gränshastigheten för erosion överskrider förmodligen närmast klotstäckets och är således en av orsakerna till det tunna klotstäckets som produceras i detta avsnitt.

I delen nedströms punkt 1 erhålles ett mycket tjockt klotstäckes jämfört med vad som enligt tillväxtteorin borde bli i detta avsnitt. Denna tjocklek uppstår emellertid inte under den egentliga tillväxtfasen. När kanten av klotstäckets når fram till denna trånga sektionen (sektion 225), strömmar en mängd klotsar under täcket ända tills de totala friktionsförlusterna blir så stora att vattenytan uppströms den trånga sektionen stiger, och fortsatt tillväxt av täcket blir möjlig. Dessa klotsar som passerar den trånga sektionen lägger sig under täcket när vattenhastigheten minskat nedströms denna. I den trånga sektionen (sektion 225) har konstaterats en mycket god överensstämmelse mellan teori och experiment vad avser h_{exp} , h_{ber} och h_{ero} . Försöken att

finna någon dimensionerande sektion för det tjocka klotstäckets i nedströmdelen. har inte gett något positivt resultat. Klotstäckets tjocklek begränsas dock av de teoretiska värdena enligt tillväxtteorin ($>$ tillväxtteorin) och erosionshöjden.

7.3. Variabel sektion, stående låda.

Resultaten i denna försöksomgång liknar i det mesta resultaten i försöken med liggande låda. I avsnittet nedströms skärningspunkt 1 erhålles ett alltför tjockt klotstäcke i jämförelse med vad som vore motiverat enligt Parisset-Haussers tillväxtteori. Orsakerna till detta är desamma som beskrivs i kapitel 7.2, dvs de klotsar som passerar under täcket i den trånga sektionen fastnar på täckets undersida där hastigheten har sjunkit så pass att borttransporten upphör.

Över lådans mittdel mellan punkterna 1 och 2 växer inte klotstäckets till den tjocklek som teoretiskt beräknats enligt Parisset-Haussers teori. Orsakerna till detta kan i dessa försök förklaras enligt 1) i kapitel 7.2. Klotstäckets tillväxt antas där ske vid en vattenhöjd H som är något lägre än den efter täckets bildande uppmätta höjden. Förklaringen enligt 2) i kapitel 7.2. gäller här vad avser höjningen av vattenhastigheten med ett antal procent. Beror på lådans bredd erhålles här en förhöjning av den med rännan parallella hastigheten på mellan 4 och 12%. Däremot orsakar inte lådan i detta fall någon ändring av strömlinjerna så att dessa riktas mot klotstäckets. Med lådan i vertikalläge erhålles en svängning av strömlinjerna mot glasväggen i rännan. Detta medför en ojämn hastighetsfördelning i tvärsnittet och klotstäckets tjocklek kommer att variera även i tvärled. Största tjockleken erhålles vid den sida där den största hastigheten råder.