

Författare

Jan Asztely * Lars Bergdahl

Program för examensarbete i Vattenbyggnad 1967:1

Experimentell undersökning av grunddammars och luftbubbelridåers
reducerande effekt på ett kombinerat täthetsberoende och vindgene-
rerat utbytesflöde

Vid omslag från motlandsvind till frånlandsvind drivs det uppvärmda ytvattnet ut från kusten och ersätts med kallare vatten från lägre liggande skikt. Enligt uppgift kan därvid temperaturen i badviken vid Gunnarsö, Oskarshamn, under sommarsäsongen sjunka från 18 a 20°C till 8 a 10°C inom loppet av några dygn. Utbytet mellan havet och viken vid ett sådant tillfälle kan karakteriseras som en kombination av ett täthetsberoende och ett vindgenererat utbyte.

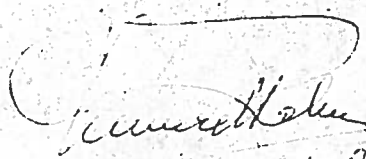
Avsikten med examensarbetet är att i en stiliserad modell studera dels grunddammars och dels luftbubbelridåers reducerande effekt på ett kombinerat täthetsberoende och vindgenererat utbytesflöde. Försöken utföres i institutionens fasta, glasade betongränna. Vind alstras med hjälp av en fläkt. Täthetsdifferensen mellan kallt och varmt vatten simuleras med systemet saltvatten - rent vatten. Salthalten bestämmes med hjälp av konduktivitetmätning.

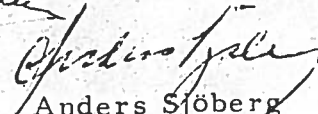
Utbytet mellan "havet" och "viken" skall studeras vid följande förhållanden med och utan vind:

- a. Utan reducerande anordning
- b. Med grunddamm
- c. Med luftbubbelridå

Vindstyrkor, dammhöjder, luftmängder m. m. samt antalet försök bestämmes under försökens gång. Försöksresultaten bearbetas så att en relativ jämförelse mellan olika reducerande anordningars effektivitet kan göras. Resultaten transformeras till prototypen enligt handledarens anvisningar. Lämplig litteratur kommer att anvisas.

Göteborg den 1 mars 1967


Lennart Rahm


Anders Sjöberg

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

- 1 Examensarbetets ändamål
- 2 Hydrologisk beskrivning
 - 2.1 Topografi
 - 2.2 Vindförhållanden
 - 2.3 Temperaturförhållanden
 - 2.4 Salthaltsförhållanden
 - 2.5 Utbytesmekanismen
- 3 Teoretisk modell
- 4 Modellregel
 - 4.1 Enbart täthetsberoende utbytesströmning
 - 4.2 Vindgenererat flöde
 - 4.3 Kombinerat täthetsberoende och vindgenererat flöde
- 5 Beskrivning av modellen
- 6 Mätmetod och mätutrustning
- 7 Försökets utförande
- 8 Försöksresultatet
 - 8.1 Bearbetning av mätvärden
 - 8.2 Reduceringsanordningarnas effektivitet
 - 8.3 Överföring till prototypen

1. Examensarbetets ändamål

Föreliggande examensarbete redovisar en undersökning, som syftat till att genom laboratorieförsök prova olika metoder att reducera täthetsberoende utbytesströmning samt den inverkan eventuell vind har på resultatet.

Försöken är föranledda av ett praktiskt behov att förhindra kallvatteninträngning i en badvik vid Gunnarsö havsbad utanför Oskarshamn. Badgästerna har under årens lopp under badsäsongen klagat över att temperaturen i vattnet sjunkit upp till 10 grader under ett dygn. Mätningar som bekräftat denna uppgift finns inte tillgängliga. Däremot har man vid hydrologiska undersökningar för ett atomkraftverk på Simpevarphalvön, belägen ca 20 km norr om Oskarshamn, konstaterat dygnsamplituder på upp till 6,5 grader i havet intill kusten

2. Hydrologisk beskrivning

För att ge laboratorieundersökningarna vederbörlig anknytning till de hydrologiska förhållandena i viken och havet erfordras en kort beskrivning av dessa. Som underlag för denna ligger SMHI:s undersökningar från Simpevarp [7] samt ritningar uppgjorda av Skånska Cementgjuteriet och Stadsingenjörskontoret i Oskarshamn. Vidare är avsikten att ge en beskrivning av den mekanism som torde vara orsaken till den anmärkningsvärt snabba nedkylningen av vattnet i viken.

2.1 Topografi

Beträffande vikens form och djupförhållanden se figur 1. Viken har en yta om ca $36\,000\text{ m}^2$ och medeldjupet är ca 2,5 m. Viken mynnar i nordlig riktning genom två sund till angränsande vatten. Därav är det västliga förhållandevis grunt och smalt, varför det östliga, som mynnar direkt ut i Kalmarsund, kan anses svara för vikens huvudsakliga vattenutbyte. En tvärsektion av det senare sundet finns uppritad i figur 2. Läget av denna är angivet i figur 1.

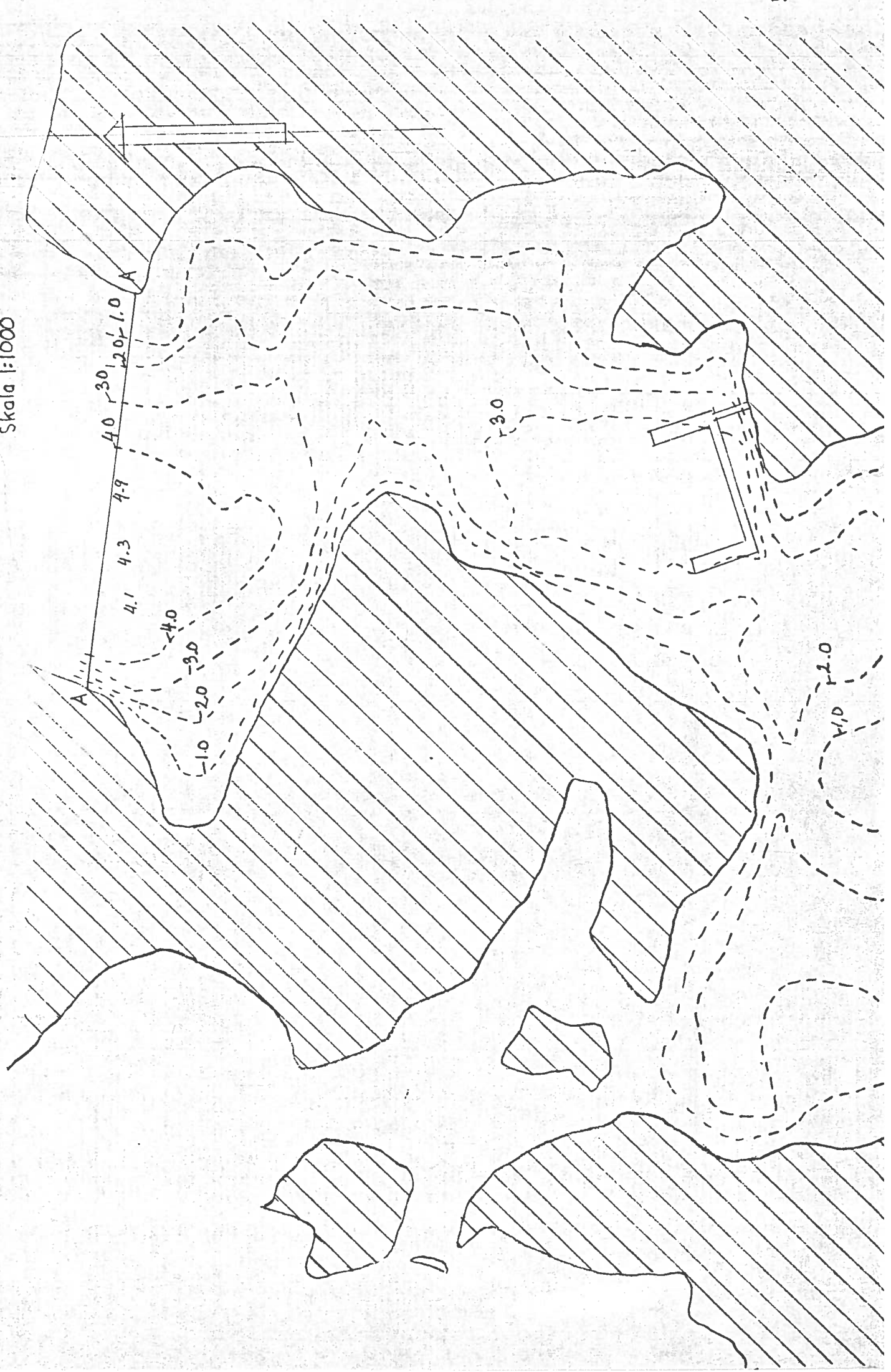
I söder finns ett sund, som är avskuret av vägbanken för vägen till Gunnarsö. Ett jämförelsevis obetydligt vattenutbyte kan där ske igenom en trumma genom vägbanken.

Kusten utanför viken är helt oskyddad. Havsbotten sluttar svagt ut från kusten. På avstånd 150-200 m från kusten återfinns

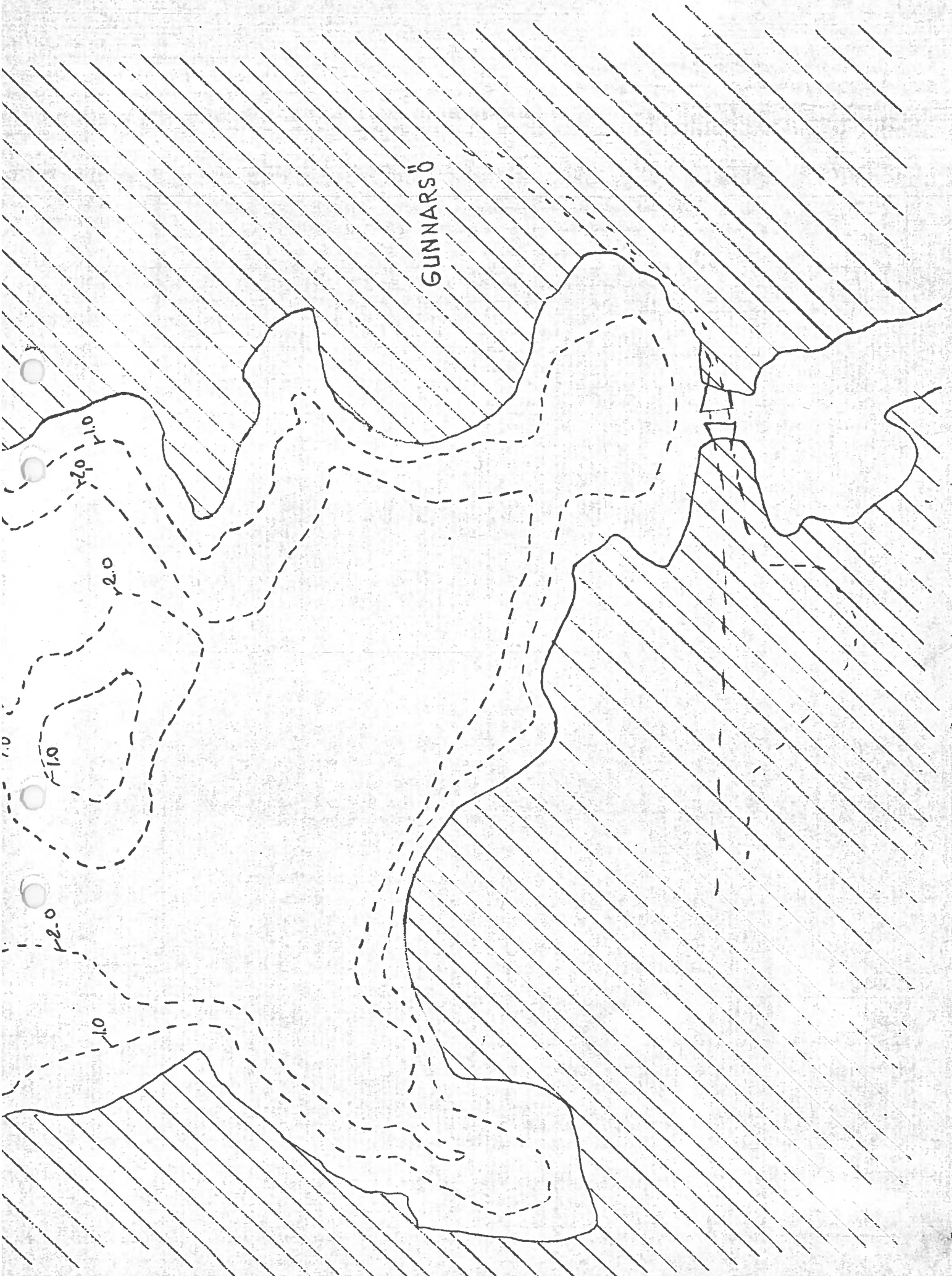
Final

GLUNNARSÖBADET

Skala 1:1000



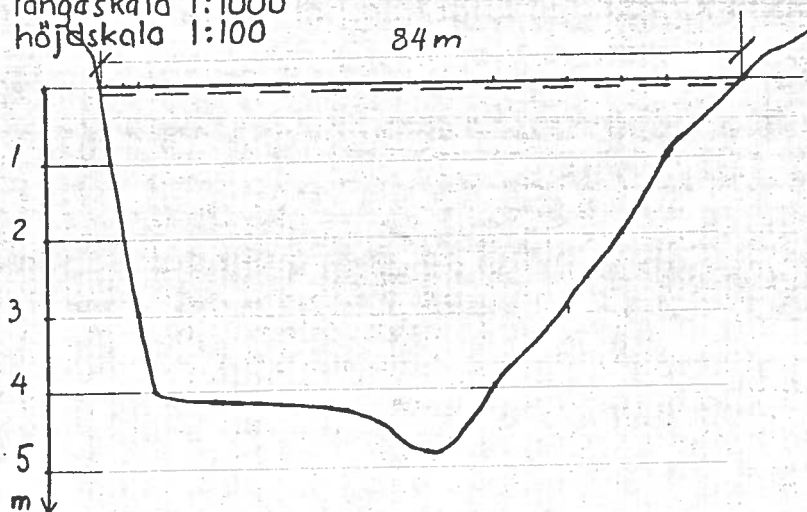
GUNNARSÖ



djup om 10 m, och först på avstånd om 6 km finner man djup, som är större än 20 m.

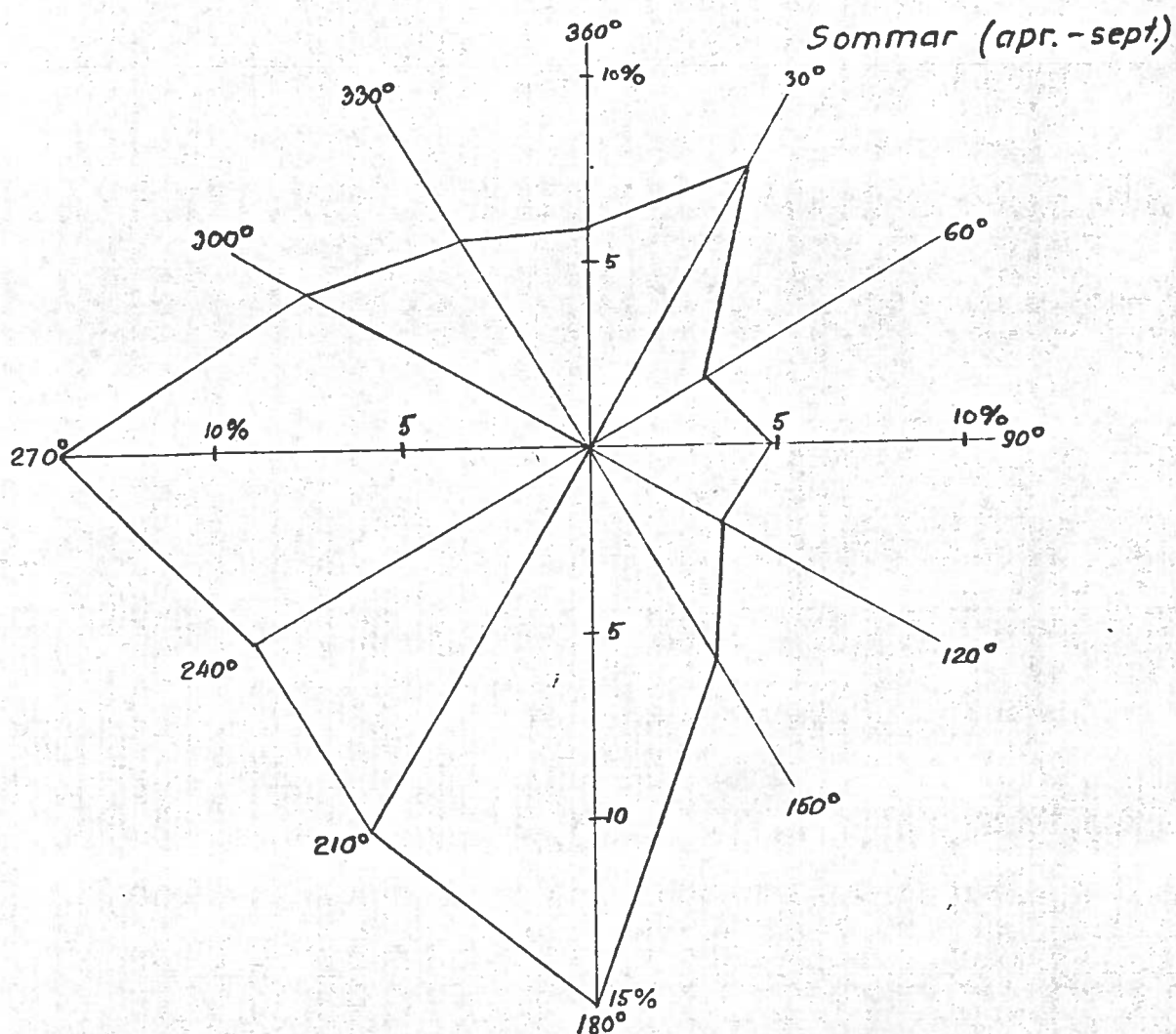
fig:2

TVÄRSEKTION A-A
längdskala 1:1000
höjdskala 1:100



2.2 Vindförhållanden

fig 3
VINDROS FÖR SIMPEVARP SOMMAREN 1964
SMHI



Enligt vindrosen (fig. 3) efter mätningar från Simpevarp [7] för perioden april-september är västliga och sydliga vindar dominerande. Ca 15% av alla observationer utgöres under denna period av sydliga och 14% av västliga.

2.3 Temperaturförhållanden

Det fria läget mot havet gör att vattnet i havet utanför viken är tämligen omblandat. Man finner endast små temperaturgradienter i vertikalled ända ned till 15-20 m djup. Där är ett temperaturberoende språngskikt utbildat. Ett undantag är vid varmt och lugnt väder, då ytvattnet värmes upp. Man har vid mätningar [7] under sådana betingelser konstaterat relativt stora temperaturgradienter redan vid 3 m djup.

2.4 Salthaltsförhållanden

Salthalten i havet är praktiskt taget konstant ned till 50-60 m djup. Vid denna nivå finns ett språngskikt utbildat, ett område med relativt stor salthaltsgradient.

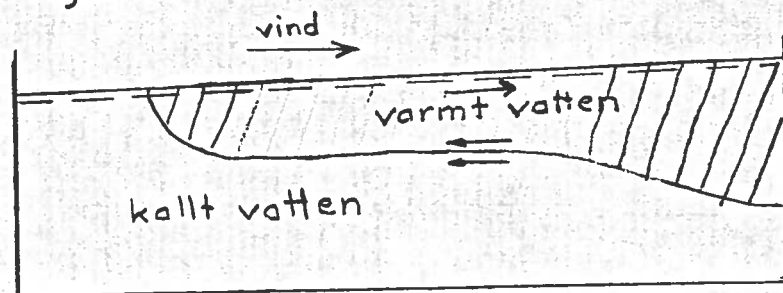
Inga sötvattendrag mynnar inne i viken, varför vattnet i viken kan antagas ha samma salthalt som det i övriga havet.

2.5 Utbytesmekanism

Ovan nämnda hydrologiska förhållanden torde räcka för att ge en möjlig förklaring till den mekanism som bestämmer utbytet av varmt vatten i viken och kallt vatten från havet utanför.

Vid västliga vindar pressas varmt ytvatten från kusten och ersätts av kallt vatten som väller upp från nivåer under språngskiktet vid 15-20 meters djup. (Se principskissen i figur 4).

fig:4



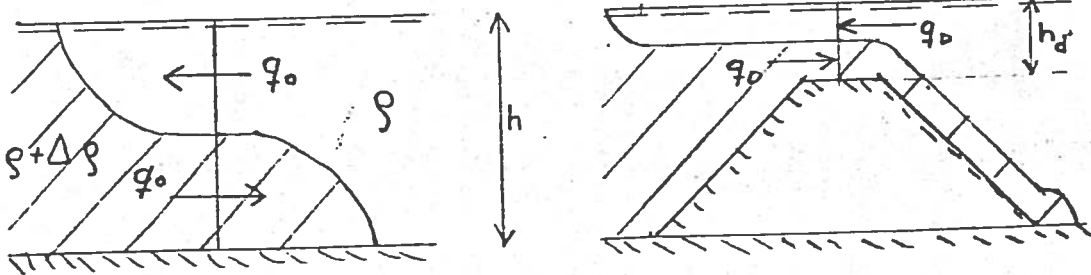
På grund av att viken mynnar i nordlig riktning till havet pressas inte det varma vattnet i viken omedelbart ut vid västliga vindar. Ganska snart torde en temperaturskillnad och en därmed sammanhängande täthetskillnad mellan vik och hav ge upphov till täthetsberoende strömning. En kall bottenström tränger in i viken från havet och pressar ut varmt ytvatten ur viken. Denna strömning kan antagas bli särskilt accentuerad då en period med västliga vindar efterträder en period med varmt och lugnt väder. Resonemanget bör ses som en schematisk bild av det verkliga förloppet. Bl. a. är det svårt att utan ingående undersökning i prototypen avgöra hur stor del av utbytesförloppet, som är rent täthetsberoende och hur stor del, som är rent vindgenererat.

3. Teoretisk modell

Den teoretiska modellen bygger på antagandet att man skulle kunna erhålla det totala utbytesflödet genom att superponera täthetsberoende och vindgenererat flöde.

En täthetskillnad, $\Delta \rho$, mellan två vätskemassor med samma vattennivå ger upphov till en utbytesströmning enligt fig. 5.

fig: 5



Vid horisontell botten och jämbred rektangulär sektion gäller

$$q_0 = \text{koeff} \cdot b \cdot h \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h}; \quad \text{koeff} \approx 0,25$$

För en damm med höjden $h - h_d$ skulle då gälla, om man bortser från avbördningsförhållanden över dammen:

$$q_d = \text{koeff} \cdot b \cdot h_d \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h_d}$$

Alltså skulle dammens reducerande effekt erhållas som

$$\frac{q_o}{q_d} = \left(\frac{h}{h_d}\right)^{3/2} \cdot \text{koeff}; \quad \text{koeff} \approx 1$$

Det täthetsberoende utbytet kan även reduceras med hjälp av luftbubbelridå. En luftbubbelridå erhålles genom att pressa ut luft genom perforerad slang eller rör som lagts ut tvärs kanalen eller vattendraget. Den ger en strömbild enligt fig. 6 a och b.

fig 6a
Flödestyp I

$$Fr = \frac{u_{max}}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh}} > 1,4$$

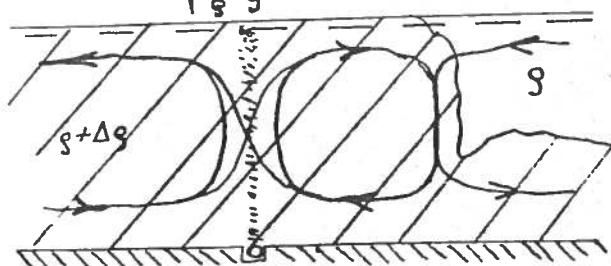
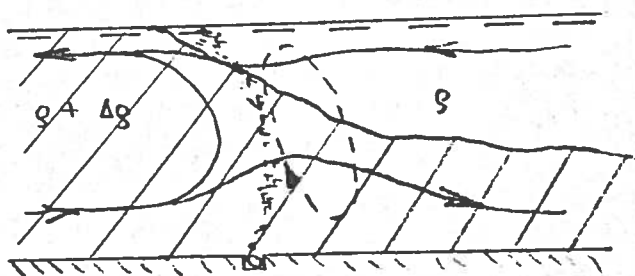


fig 6b
Flödestyp II

$$Fr < 1,4$$



I täthetshomogent och stillastående vatten erhålles en hastighetsprofil enligt fig. 7 a, där $u_{max} = k \cdot (g \cdot Q)^{1/3}$. Koefficienten k beror av vattendjupet, bubblornas storlek samt munstyckenas centrumavstånd. k är av storleksordningen 1, 2. Q är luftmängd per längdenhet av bubbelridån ($m^3/s \cdot m$).

fig:7a
Principiell hastighetsfördelning till höger om en bubbelridå.

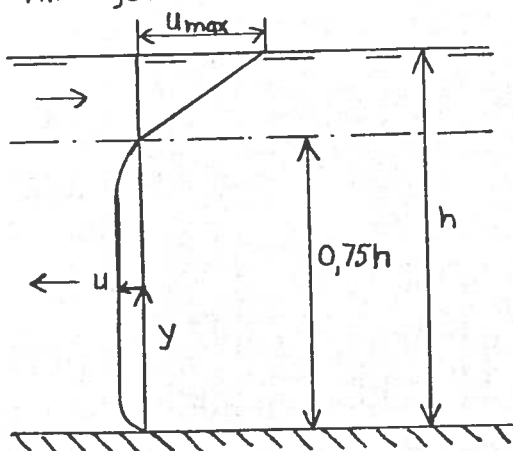
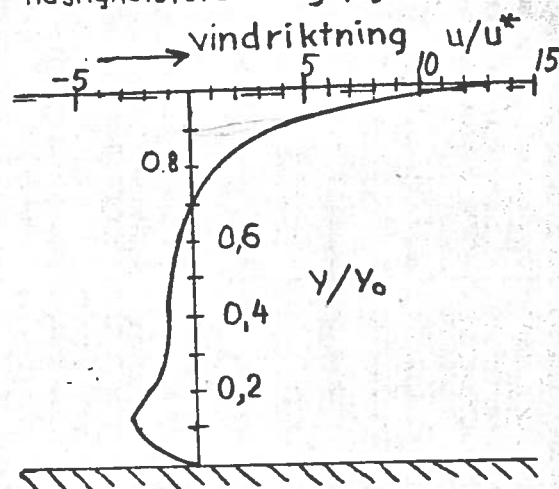


fig:7b
Hastighetsfördelning p.g.a vind.



Enligt Sjöberg [1] erhålles maximal reduktion av utbytesflödet om

$$u_{\max} / \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh} > 1,4.$$

I en kanal med konstant bredd och horisontell botten har utbytet q_r reducerats till

$$q_r = 0,1 \cdot q_0$$

Denna reduktion gäller stationärt flöde. Under icke stationära förhållanden är reduktionen mindre.

Den vindgenererade hastighetsprofilen i en kanal med täthets-homogent vatten har enligt Baines och Knapp [2] utseendet enligt fig. 7 b. y är där avståndet från ytan och y_0 är rännans djup. u är hastigheten och $u^x = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ är skjuvspänningshastigheten. ρ är vätskans täthet. Skjuvspänningen på vattenytan är enligt Bo Hellström [3] ungefär

$$\tau = 0,40 \cdot 10^{-3} w^{1,8} \cdot g(N/m^2), \text{ där } w = \text{vindhastigheten}$$

Ythastigheten erhålles enligt diagrammet i figur 7 b till

$$u_w = 13 u^x$$

och utbytesflödet till

$$q_w = 1,2 \cdot h \cdot u^x$$

Med en damm skulle man då kunna antaga en reduktion av minst

$$\frac{q_{w_0}}{q_{w_d}} = \frac{h}{h_d}$$

Reduktionen av det vindgenererade och täthetsberoende utbytet med bubbelridå är det svårt att uttala sig om, men den totala reduktionen med damm skulle kunna vara

$$\frac{q_0 + q_{w_0}}{q_d + q_{w_d}} = \frac{q_0 + q_{w_0}}{q_0 \left(\frac{h_d}{h}\right)^{3/2} + q_{w_0} \left(\frac{h_d}{h}\right)}$$

Denna approximativa teori kan endast ge en uppfattning om möjlig reduktion och möjliga utbytesflöden. Superponeringen av q_0 och q_w är mycket tvivelaktig och ger troligen för stora värden på utbytet. Den blandning i vertikal led som vinden ger upphov till

kan i viss mån reducera utbytet. Den hastighetsfördelning som använts vid vindgenererat flöde har i [2] bestämts i en kanal där man hämmat vågbildning genom att tillsätta tvättmedel.

Vår försöksserie skulle med ovanstående teori ge värden enligt nedanstående tabell. ($\Delta\rho = 2,0 \text{ kg/m}^3$)

Vindhastighet, m/s	0	4	9
Fri sektion ($h = 0,3 \text{ m}$)	1	1	1
10 cm damm ($h_d = 0,2 \text{ m}$)	1,8	1,7	1,6
20 cm damm ($h_d = 0,1 \text{ m}$)	5,2	4,2	3,9

Eller om jämförelsen hela tiden göres med fri sektion utan vind.

Fri sektion	1	0,7	0,5
10 cm damm	1,8	1,2	0,9
20 cm damm	5,2	2,9	2,0

4. Modellregel

Det är svårt, för att inte säga omöjligt, att i en modell exakt återge det mycket komplexa förhållandet i prototypen. De för skalningen mellan modell och prototyp signifikanta parametrarna bör dock kunna anges. För dynamisk likformighet krävs då, att dessa parametrar har samma värde i prototyp och modell och att modellen är geometriskt likformig med prototypen. Alla ur försöken hämtade dimensionslösa data är då funktioner av dessa parametrar.

4.1 Enbart täthetsberoende utbytesströmning

Täthetsberoende strömning är en form av tvålagerströmning. Enligt Sjöberg [1] är Reynolds tal Re och Froudes densimetriska tal F_Δ de parametrar, som i huvudsak kan anses styra förloppet vid rent täthetsberoende strömning. Påståendet bygger bl. a. på antagandena att vattenytan är horisontell, att blandningsutbytet mellan de två flödena är försumbart samt att strömningsbilden domineras av de interna gravitationskrafterna, representerade av den reducerade jordaccelerationen $\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g$. Att både ta hänsyn till Re och F_Δ i en modellregel är fortfarande mycket svårt. Därför har vid försöken eftersträvat att ha en sådan kombination av vattendjupet h och relativa täthetsdifferensen $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, att flödes hastigheterna i modellen blir så stora, att de viskösa krafterna kan försummas. Kort uttryckt skulle alltså Re i modellen vara större än ett "kritiskt" Reynolds tal. Enligt Sjöberg [1] har det gjorts försöksserier med täthetsberoende utbytesströmning i en prismatisk kanal, där man har fått fram värden på Re_{kr} . Vid

dessa försök definieras ett densimetriskt Reynolds tal $Re_{\Delta} = \frac{h}{\nu} \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} gh \right]^{1/2}$, vilket erhöles genom att i den vanliga formen för $Re = (UL)/\nu$ sätta in höjden h som karakteristisk längd L och den densimetriska hastigheten $\left[\frac{\Delta \rho}{\rho} gh \right]^{1/2}$ som karakteristisk hastighet U . Då modellvikens längd i förhållande till vattendjupet sattes till 10 erhöles enligt [1], sid. 23, värdet på $Re_{\Delta kr} \approx 5 \cdot 10^3$. I den tänkta modellen sattes:

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

$$\text{vattendjupet } h = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{relativa täthetsdifferensen} = 10^{-3}$$

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

$$Re_{\Delta} \text{ blir då } 1,4 \cdot 10^4 > Re_{kr}$$

Kvarstående styrande parameter blir alltså F_{Δ} . Då man dessutom funnit, att F_{Δ} är approximativt konstant, om $Re > Re_{kr}$, gäller vid geometrisk likformighet, att t. ex.

$$\frac{u_m}{\left[\frac{\Delta \rho}{\rho} gh \right]_m^{1/2}} = \frac{u_p}{\left[\frac{\Delta \rho}{\rho} gh \right]_p^{1/2}}$$

dvs. att alla från modellen hämtade dimensionslösa data är lika med motsvarande data från prototypen om endast villkoret $Re > Re_{kr}$ är uppfyllt.

4.2 Vindgenererat flöde

För ett turbulent flöde med fri vattenyta gäller Froudes modellregel. För ett vindgenererat flöde gäller då om $Re > Re_{kr}$ att dynamisk likformighet erhöles om

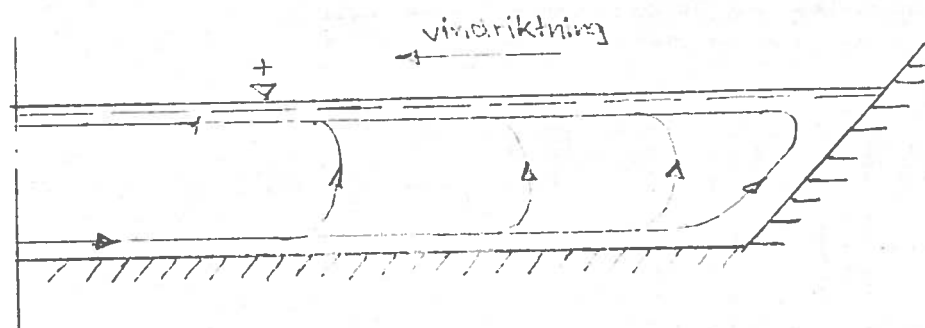
$$\frac{u_w}{\left[gh \right]_m^{1/2}} = \frac{u_w}{\left[gh \right]_p^{1/2}}$$

Reynolds tal kan för den tänkta modellen tecknas $Re = \frac{u_w \cdot h}{\nu}$, vilket med vindhastigheten 4 m/s ger $Re \approx 3 \cdot 10^4$ vilket förutsättes tillräckligt för att flödet skall vara turbulent.

I en lång kanal är hastighetsfördelningen i princip lika i prototyp och modell. Då den tänkta modellen var relativt kort kunde man befara att någon utpräglad tvålagerströmning ej skulle utbildas. Botten-

strömmen skulle vid stora vindstyrkor lyftas i ett relativt brett bälte vid modellens lovartsände enligt fig. 8. Vindhastigheten i modellen bör därför troligen väljas lägre än enligt regeln.

Fig. 8



4.3 Kombinerat täthetsberoende och vindgenererat flöde

Även för detta fall förutsättes att F_{Δ} är approximativt konstant. För dynamisk likformighet krävs då förutom tidigare villkor, att förhållandet mellan de av täthetsdifferensen och av vinden genererade hastigheterna är lika i modell och prototyp, dvs.

$$\frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_m^{1/2}} = \frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_p^{1/2}} \quad \text{och} \quad \frac{u_w}{[gh]_m^{1/2}} = \frac{u_w}{[gh]_p^{1/2}}$$

vilket också kan skrivas

$$\frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_m^{1/2}} = \frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_p^{1/2}} \quad \text{och} \quad \left[\frac{\Delta\rho}{\rho}\right]_m = \left[\frac{\Delta\rho}{\rho}\right]_p$$

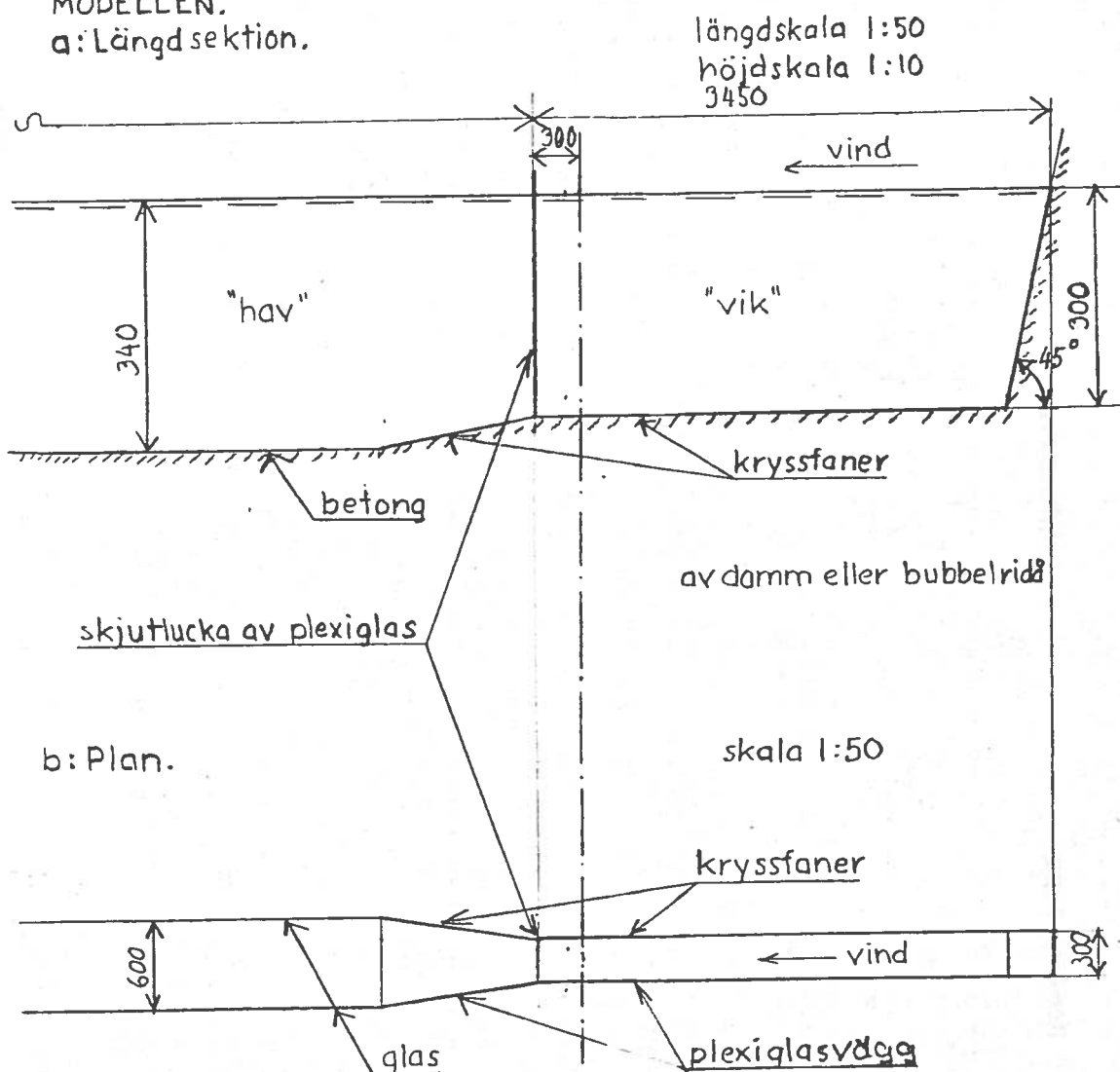
Om dessutom en bubbelridå utnyttjas krävs att

$$\frac{u_{\max}}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_m^{1/2}} = \frac{u_{\max}}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho}gh\right]_p^{1/2}} \quad (\text{se [1]})$$

5. Beskrivning av modellen

Försöken avsågs ge en bild av hur olika anordningar fördröjer utbytet av det varma vattnet i badviken. Vi använde vid försöksserien en stiliserad modell av badviken och havet (fig. 9). En skalad modell hade blivit mycket dyr att bygga. Dessutom skulle det ha krävts mycket utförliga uppgifter om förhärskande vindriktningar, temperaturvariationer, havsströmmar m.m. för att de erhållna försöksresultaten skulle bli av större värde än de nu erhållna.

fig:9
MODELLEN.
a: Längdsektion.



Den stiliserade modellen utformades som en ränna enl. fig. 9. Den vänstra delen, som gjordes dubbelt så bred och mycket längre än den högra delen, fick utgöra havet. Den högra delen fick föreställa badviken. Dessa delar kallas i det följande "havet" respektive "viken".

"Viken" försågs i bortre delen med en strand i 45° lutning. Alla övriga begränsningsytor var vertikala.

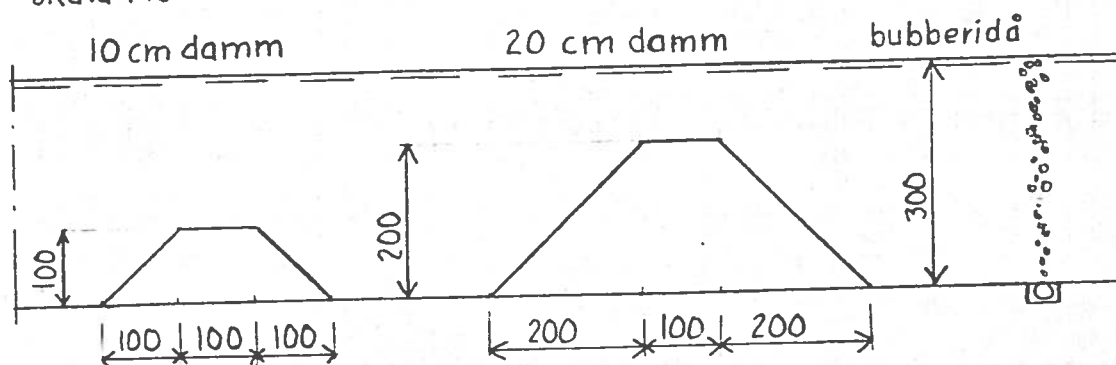
I inre delen av "vikens" mynning insattes en skjutlucka av plexiglas, som bortlyftes helt varje gång ett försök startades. Luckan tätades med båtmönja mot sidor och botten. En spetsmätare monterades över "havet" och en över "viken".

Innanför "viken" placerades en centrifugalfläkt med reglerbart varvtal. Rännan övertäcktes med luckor och vindhastigheten över vattenytan mättes vid olika varvtal. 500 varv/min befanns motsvara ca 8 knop och 1000 varv/min ca 18 knop d. v. s. 4 m/s respektive 9 m/s.

Temperaturskillnaden i prototypen mellan hav och vik innebär, att en täthetskillnad råder. En temperaturskillnad på 10° , mellan $+8^\circ\text{C}$ och $+18^\circ\text{C}$, motsvarar vid 7‰ salthalt en täthetsdifferens på $1,4 \text{ kg/m}^3$. Vid försöken användes sött vatten i "viken" och saltat vatten i "havet" med samma temperatur. Detta dels för att det är lättare att kontrollera salthalten än temperaturen, dels för att man relativt lätt kan mäta vattnets salthalt. Dessutom färgades "havsvattnet" med kaliumpermanganat så att man kunde iakttaga händelseförloppet vid varje försök.

Försöken genomfördes dels utan dammar eller bubbelridå, dvs. med full sektion i mynningen, dels med två olika höga undervattensdammar och dels med en bubbelridå. Dammarna och bubbelridån placerades med sitt centrum 0,3 m från mynningen. Se fig. 9. Dammarnas utformning enligt fig. 10.

fig:10
skala 1:10



Bubbelridån bestod av ett mässingsrör med 0,8 mm hål med ett centrumavstånd av 10 mm. Luften tillfördes från en gasflaska via en luftflödesmätare, vilken kalibrerades före försöket.

För att få en jämnt fördelad bubbelridå måste vi tillföra en luftmängd på 2,45 l/min, dvs. $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$. Denna ger enligt kap. 3 en ythastighet $u_{\text{max}} = 0,13 \text{ m/s}$. För att få maximal reduktion krävs att

$$u_{\text{max}} > 1,4 \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot gh}$$

$h = 0,3 \text{ m}$, $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 10^{-3}$ ger $u_{\text{max}} > 0,075 \text{ m/s}$. Detta villkor uppfylles alltså med den valda luftmängden.

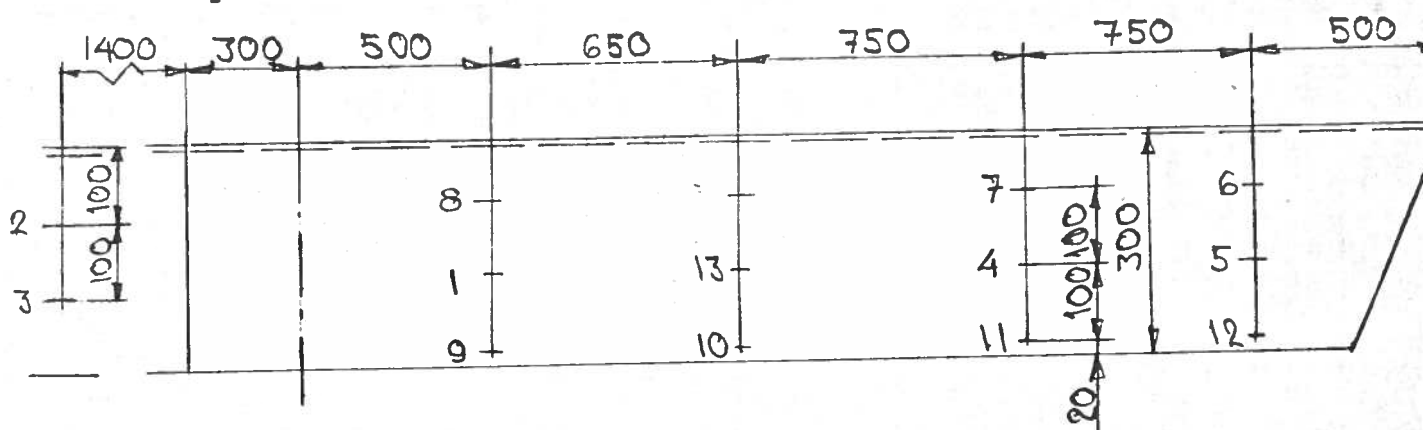
För försöken med vind prövades också med större luftmängder än den enligt ovan optimala. För 4 m/s användes även 5 l/min vilket motsvarar $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sm}$ och för 9 m/s försöktes med 12 l/min motsvarande $6,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sm}$. Dessa vindhastigheter ger ythastigheterna 0,09 m/s respektive 0,18 m/s.

6. Mätmetod och mätutrustning

Vid försöken mättes salthalten i 11 punkter i "viken" och två punkter i "havet". För att mäta salthalten utnyttjades förhållandet att saltlösningens ledningsförmåga är praktiskt taget proportionell mot salthalten i det aktuella salthaltsområdet.

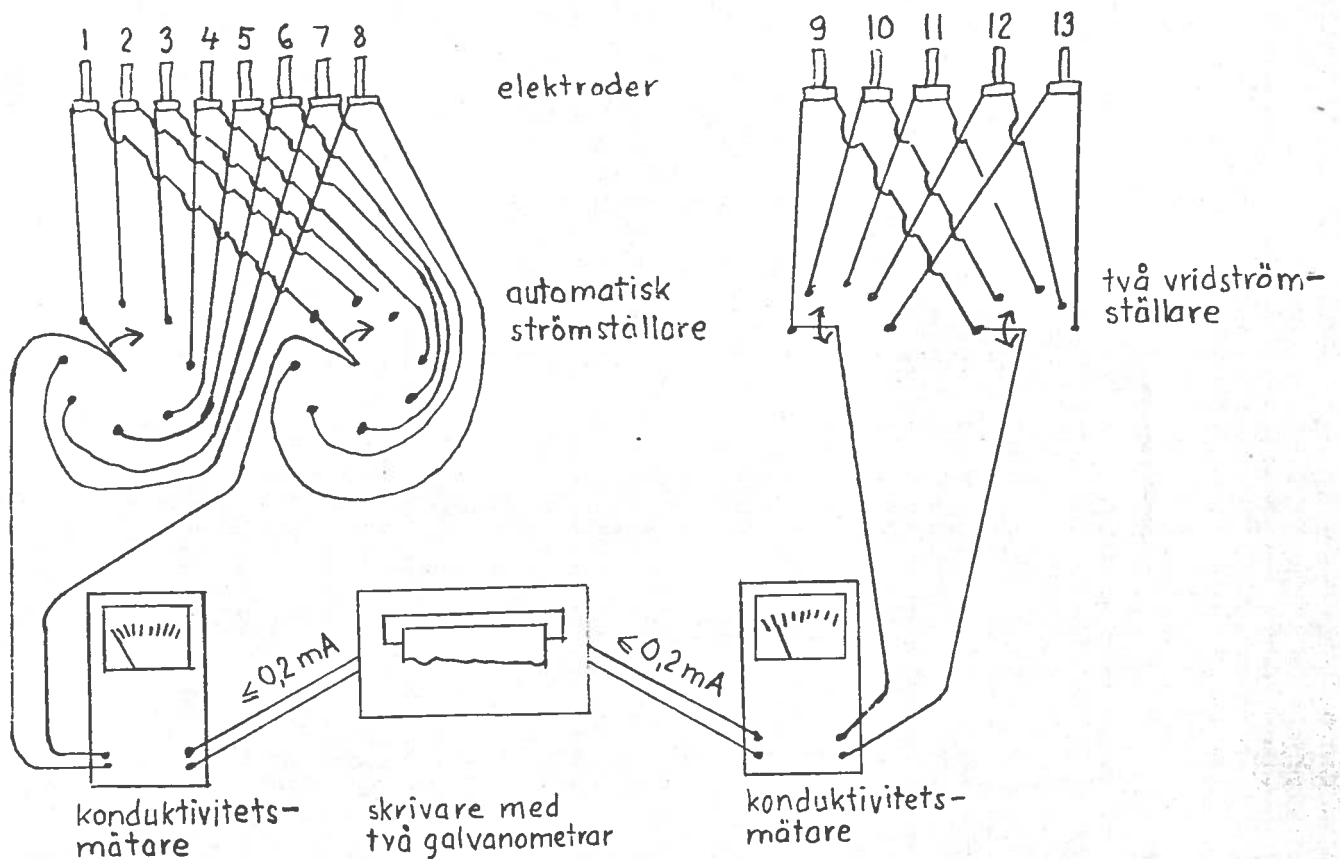
För att mäta ledningsförmågan (konduktiviteten) användes konduktivitets celler, dvs. speciella elektrodpar. Dessa arrangerades i rännan enligt fig. 11. De var av två olika typer och kopplades över strömställare i en bestämd ordning via två mätinstrument till två galvanometrar i en fotoskrivare.

fig 11 Mätcellernas placering.



Fotoskrivaren var försedd med en timer, som ritade ett märke på det kontinuerligt frammatade papperet var 10:e sekund. Åtta av cellerna kopplades till sitt mätinstrument med hjälp av en automatisk rotationsströmställare, som inställdes så att varje cell var inkopplad ca 3 s. De övriga fem anslöts manuellt med två vridströmställare. Observera att man måste bryta och sluta strömmen över båda polerna på cellerna. För varje galvanometer inställdes två referenslinjer på skrivaren. En principskiss över uppkopplingen finns i fig. 12. På detta sätt kunde konduktiviteten mätas på två punkter samtidigt i modellen.

fig:12
Skiss över instrumentens uppkoppling.



7. Försökets utförande

Vattnet fylldes i bassängen till 30 cm höjd över botten i "viken", varefter spetsmätarna inställdes så att de nått och jämnt nådde vattenytan. Därefter stängdes luckan, salt och kaliumpermanganat blandades in i vattnet i "havet" så att önskad täthetsdifferens erhöles. Vattnet

i "havet" blandades med hjälp av en sänkbar pump. Därefter kontrollerades temperaturen på båda sidor och den justerades så att temperaturskillnaden var mindre än en grad Celsius (i de flesta fall mindre än en halv grad). Vid de försök som utfördes efter det första varje dag byttes endast vattnet i "viken", medan vattnet i "havet" rörde om och justerades med avseende på salthalten.

Före varje försök kontrollerades att mätutrustningen var i ordning samt att strömställarna stod i utgångsläge.

Vid tiden $\tau = 0$ drogs skjutluckan bort och fotoskrivaren slogs till. Därefter sattes rotationsomkopplaren i gång och vi började vrida de manuella omkopplarna i den bestämda ordningen. Alla dessa värden registrerades då automatiskt i fotoskrivaren, vars timer även mätte tiden.

Vid försöken gjordes även en del kompletterande iakttagelser beträffande bottenströmmens höjd, strömningsbilden och blandningen vid inströmningen.

Försöken pågick $1/4 - 3/4$ timme. Därefter slogs mätutrustningen ifrån, fotopappret revs av och försökets nummer antecknades på detta. Temperatur, vind, dammtyp, använda mätområden m. m. antecknades på en för ändamålet gjord blankett.

Följande försöksserier genomfördes; 2 salthalter: ca 0,8 resp. 1,8 ‰, 4 olika reduktionsanordningar: ingen damm, 10 cm damm, 20 cm damm resp. bubbelridå, 3 vindar: 0 m/s, 4 m/s resp. 9 m/s. Det vill säga $2 \times 4 \times 3 = 24$ försök. De två försöken utan vind och utan damm, vilka utgör jämförelsematerialet, dubblerades. Försöksserien kompletterades slutligen med 2×2 försök med bubbelridå med luftmängderna 5 l/s och 12 l/s vid vindstyrkorna 4 m/s resp. 9 m/s. Sammanlagt utfördes 32 försök, från vilka resultat erhöles. En del misslyckades helt p. g. a. diverse fel i mätutrustningen och handhavande.

8. Försöksresultatet

8.1 Bearbetning av mätvärdena

Primärvärdena från försöken förelåg alltså dels på fotopappret, fig. 14, dels som kortfattade anteckningar, fig. 13.

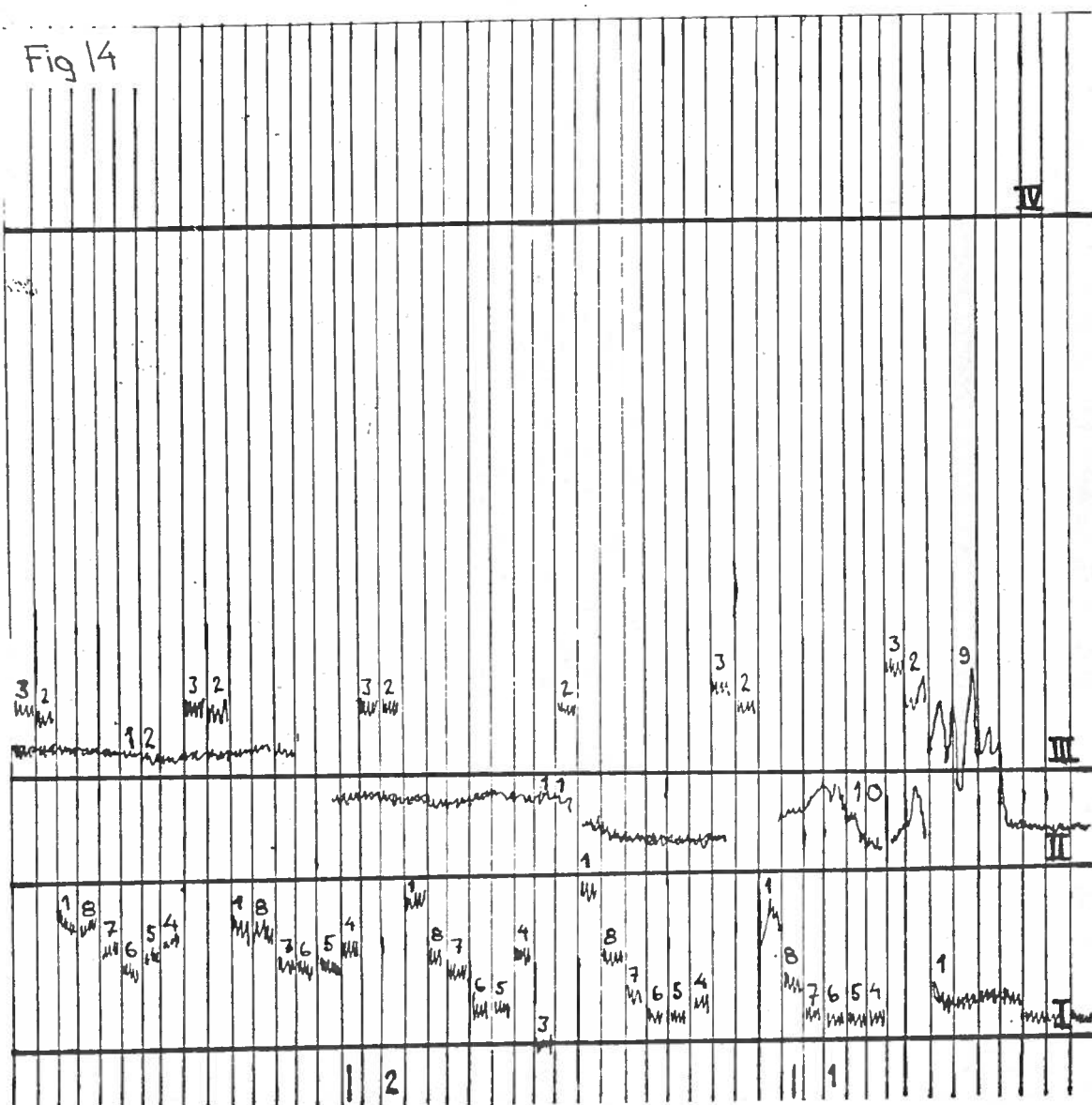
fig. 13

Nr År Mån Dag Kl
8 66 3 22 16

Mätområden $20 \cdot 10^{-3}$ o. $5 \cdot 10^{-3}$

Damm 10 cm
Vind AOPP varv/min
Salt ca 2 ‰
Temperatur 13,9 - 14,6

Kommentar till fig. 13. Salthalten är endast angiven med ett riktvärde. Det vänstra temperaturvärdet hänför sig konsekvent till "havets" temperatur och det högra till "vikens" temperatur. Det instrument, som var anslutet via rotationsomkopplaren, hade mätområden $10 \cdot 10^{-3}$ S eller $30 \cdot 10^{-3}$ S, och det, som var anslutet via den manuella omkopplaren, hade mätområdena $1,5 \cdot 10^{-3}$ S och $5,0 \cdot 10^{-3}$ S, varför ingen förväxling riskerades beträffande mätområdena.



I fig. 14 ses början på fotopapperet från försök 8. Siffrorna längst ned är tiden i minuter från försökets start. De övriga siffrorna anger cellernas nummer. De horisontella linjerna är referenslinjer, dvs. varje linje motsvarar ett visst utslag hos mätinstrumenten. I, III och IV hör till cellerna 1-8 och motsvarar utslagen $0, 10 \cdot 10^{-3}$ resp. $30 \cdot 10^{-3}$ S i detta försök. II och IV hör till cellerna 9-13 och motsvarar 0 resp. $4,5 \cdot 10^{-3}$ S i detta försök. Genom att mäta avstånden i diagrammet mellan linjerna erhöles alltså en skalfaktor nedan kallad λ . På fotopapperet uppmättes avståndet mellan skrivarens utslag vid en vald tidpunkt och utslaget i det söta vattnet i "viken". Avståndet benämnes x i tabellen i fig. 15 och är alltså ett mått på salthalten i en viss punkt. För att få det till den utvalda tidpunkten hörande utslaget hos alla cellerna interpolerades linjärt mellan två i tiden närliggande utslag.

Beteckningar i fig. 15

Storhet	Beteckning	Enhet
Tid	τ	minut
Skrivarens utslag	x	cm
Skalfaktor	λ	10^{-3} S/cm
Ledningsförmåga vid aktuell temp. och mätcell	V_t	10^{-3} S
Ledningsförmåga omräknad till 20°C och oberoende av mätcell	V_{20}	10^{-3} S
Salthalt	S	‰
Volym	V	dm ³
Delvolym	ΔV	"
Saltmängd	SV	gram
Fyllnadsgrad	φ	%

Då x och λ införts i blanketten för en viss tid τ beräknades först V_t och V_{20} .

$$V_t = \lambda \cdot x$$

$$V_{20} = \frac{V_t \cdot k}{0,022 t + 0,56}$$

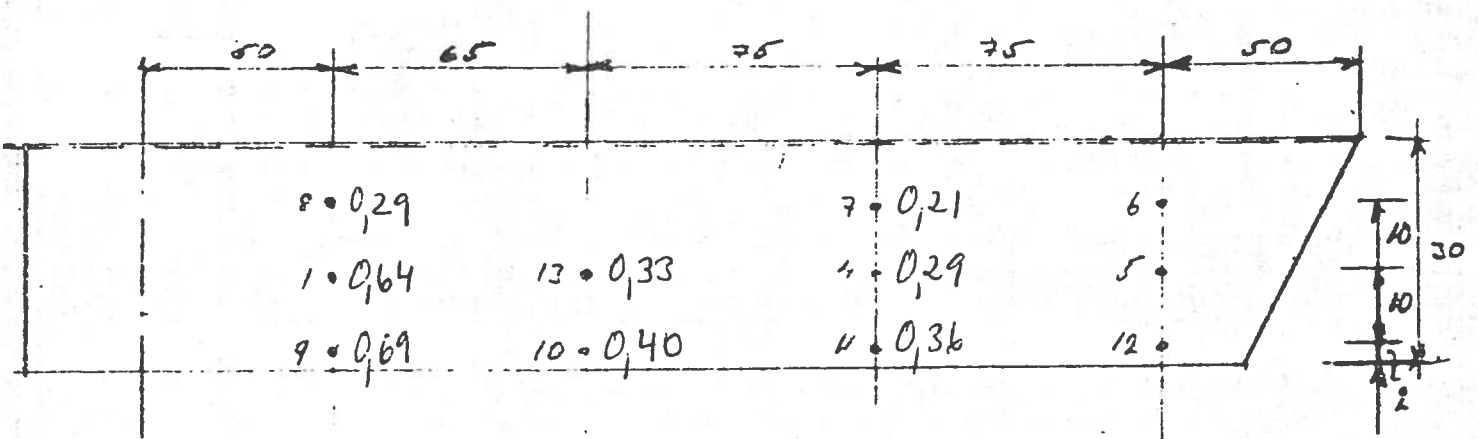
Punkt	X (cm)	Mätornir ($10^{-3} S$)	κ ($10^{-3} S/cm$)	V_t ($10^{-3} S$)	V_{20} ($10^{-3} S$)	S (‰)	ΔV (dm^3)	$S \Delta V$ (g)
1	1,8	30	2,58	4,64	1,03	0,64	24,3	15,5
4	0,9			2,32	0,47	0,29	22,5	6,5
5	0						21,0	—
6	0						31,5	—
7	0,6			1,54	0,33	0,21	42,1	8,7
8	0,8			2,06	0,46	0,29	43,1	12,3
9	1,5	5	0,5	0,75	1,11	0,69	16,1	11,1
10	0,8			0,4	0,65	0,40	15,8	6,3
11	0,7			0,35	0,58	0,36	16,9	6,1
12	0						16,2	—
13	0,7			0,35	0,53	0,33	21,0	7,0

$\sum S_i V_i = 73,5$

2	4,3	30	2,58					$(S_2 + S_3)/2 = S_u$
3	4,3							

medelvärde
av 20,3
under för-
söket 4,04

$10,42 \cdot 2,28 \cdot 1,42 S_u \cdot V = 377,9$
 $\varphi = 19,4\%$



Höjdskala 1:10

Längdskala 1:20

fig 15

k är en kalibreringskonstant för den aktuella mätcellen och t_m är medeltalet mellan temperaturen i "havet" och "viken". Salthalten beror i det aktuella området approximativt linjärt av ledningsförmågan:

$$S = V_{20} \cdot 0,62$$

ΔV är delvolymerna i "viken" innanför hindret, i detta försök en damm. Hur dessa valdes framgår av de streckade linjerna nederst i fig. 15, där också nummer är inritat till vänster om resp. punkt och salthalten till höger om denna. $S \Delta V$ är saltmängden i varje delvolym och $S_u V$ är den saltmängd, som skulle finnas i "viken", om denna var helt fylld med det salta "havsvattnet". Fyllnadsgraden φ erhölls därefter som en kvot:

$$\varphi = \frac{\sum_i S_i \cdot \Delta V_i}{S_u V} \cdot 100 \%$$

När dessa beräkningar utförts för alla försök och lämpliga tider inom dessa, beräknades täthetsskillnaden $\Delta \rho$ mellan "havets" och "vikens" vatten. Därvid användes diagram enligt K. Kalle: Fluchtentafeln zur Bestimmung der Dichte aus Salzgehalt und Temperatur des Meereswassers. Archiv der Deutschen Seewarte.

För ett täthetsberoende flöde gäller enligt kap. 3.

$$q = \text{koeff} \cdot b \cdot h_d \cdot \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h_d}; \text{koeff} \approx 1/4$$

Det är därför lämpligt, att överföra τ till den dimensionslösa tiden T .

$$T = \frac{\tau \cdot g}{V} = \tau \frac{b \cdot h_d}{4 V_d} \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g \cdot h_d}$$

Detta utfördes för alla försöken, och deras förlopp är nedan redovisade i sju diagram, med axlarna graderade i φ och T .

Följaktligen bör då ur försöken utan vind eller bubbelridå erhållna kurvor

$$\varphi = \Phi(T)$$

sammanfalla. Att så även är fallet framgår av diagram 5, även om en viss spridning föreligger.

För en modell med vind gäller däremot

$$\varphi = \varphi \left(T, \frac{\Delta \rho}{\rho}, \frac{u_w}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh}} \right)$$

och vid de måttliga variationerna av $\Delta \rho / \rho$ som använts här borde dessa kurvor ungefär sammanfalla för samma vindstyrka, med reservation för den inverkan djupet över dammarna i kombination med vågor och vind kan ha på utbytesströmningen över dammkrönet och strömningen inne i "viken". För vinden 4 m/s, diagram 6, är överensstämmelsen rätt bra, medan vid 9 m/s spridningen är rätt stor, antagligen på grund av den kraftiga turbulensen och vågbildningen över dammarna och vertikala strömvirvlar inne i "viken".

För en modell med vind och bubbelridå gäller

$$\varphi = \varphi \left(T, \frac{\Delta \rho}{\rho}, \frac{u_w}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh}}, \frac{u_{\max}}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh}} \right)$$

dvs. förhållandena blir än mer komplexa.

Av diagram 1-4 kan man få en uppfattning om hur vinden inverkar på försök, som i övrigt är likartade. Av dessa diagram framgår bl. a. att utbytet påskyndas om $u_w / \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh} < 2$ och retarderas om $u_w / \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} gh} > 3$. Förhållandet är tydligt för försöken med fri sektion eller låg damm. Detta innebär, att vid kraftig vind är det inte bara strömningsförhållandena i mynningssektionen som inverkar på utbytet utan en betydande del av bottenströmmen förs under inströmningen upp till ytan och ut med ytströmmen enligt fig. 8 kap. 4.2. Detta förhållande kunde tydligt iakttagas vid flera försök.

1. Försök utan damm
2. Försök med 10 cm damm
3. Försök med 20 cm damm
4. Försök med bubbelridå
5. Försök utan vind
6. Försök med vind 4 m/s
7. Försök med vind 9 m/s

Diagrammen återfinns längst bak.

8.2 Reduceringsanordningarnas effektivitet

För att jämföra effektiviteten hos de olika anordningarna har vi skalat tiden enbart m. a. p. tätheten.

$$T_e = \frac{\tau \cdot h \cdot b}{4 V} \left[\frac{\Delta p}{\rho} \cdot g h \right]^{1/2}$$

Här är h vikens djup. Detta redovisas nedan i 3 diagram.

8. Försök utan vind
9. Försök med vind 4 m/s
10. Försök med vind 9 m/s

Om man jämför tiderna för en fyllnadsgrad och sätter tiden för att uppnå fyllnadsgraden utan damm och vind till 1 erhålles följande tabell. Försökstypernas regressionskurvor är inritade i diagram 8-10, och tiderna för respektive försök räknas i effektivitetsjämförelsen hela tiden från respektive kurvas skärningspunkt med tidsaxeln. Vi avläser tiden på detta sätt för att eliminera skillnaderna hos de olika försökens begynnelsekedan. Luckan som skilde de två vätskemassorna i försöken var ju placerad 30 cm utanför reduceringsanordningen. En bubbelridå accelererade då täthetsströmmen fram till bubbelridån medan det däremot tog en viss tid för strömmen att stiga upp över dammarna. Således bör deras skärningspunkter med tidsaxeln ligga i ordning från $T = 0$: bubbelridå, utan damm, 10 cm damm och 20 cm damm. Se t. ex. diagram 8.

f %	Utan vind			4 m/s			9 m/s			
	30	50	70	30	50	70	30	50	70	
Utan damm	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	0,8	1,9	2,5	3,5	
10 cm damm	3,6	3,7	3,4	1,4	1,4	1,3	4,3	6,8	-	
20 cm damm	5,0	5,9	6,4	3,3	4,3	5,8	5,1	7,5	-	
Bubbel-	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$	2,5	3,5	3,8	2,1	2,5	3,0	2,3	3,0	5,0
ridå	2,8	-	-	-	2,6	2,9	3,8	-	-	-
	6,7	-	-	-	-	-	-	2,3	3,0	5,0

I och för sig ger tabellen ovan en överskådlig bild av försöksresultaten. Man ser t. ex. att utan vind är en 10 cm damm ungefär lika effektiv som en bubbelridå, medan en 20 cm damm är dubbelt så effektiv. Det kan också vara intressant att jämföra den ur försöken erhållna tabellen med den beräknade enligt kap. 3.

Vid försök utan vind ser man, att i försöken har för 10 cm damm erhållits dubbelt så höga värden som de beräknade, medan för 20 cm damm har erhållits endast något högre värden. Om man inför en avbördningskoefficient för dammarna, är den för 10 cm damm 0,5 och för 20 cm damm 0,9. Detta tycks svårt att förklara, då avbördningsförhållandena ej rimligtvis kan vara så olika för de två dammarna. Att bubbelridå endast har en reducerande effekt på ca 3,5 mot maximalt ca 10 kan förklaras av att modellen är så kort att stationära förhållanden aldrig hinner utbildas.

Vid försök med vindstyrkan 4 m/s kan man se, att de är avsevärt accelererade. Detta stämmer väl överens med den "teoretiska" modellen, speciellt för försök utan damm och med 10 cm damm. Att försöken med 20 cm damm ger så höga värden kan förklaras av att det uppstod en ganska kraftig turbulens över dammkrönet på grund av vågbildningen. Vad beträffar luftbubbelridån kan man konstatera att den vid denna relativt måttliga vindstyrka är dubbelt så effektiv som en 10 cm damm, medan en 20 cm damm fortfarande är effektivare. Detta beror möjligen på vågbildningen i modellen. Den större luftmängden gav i detta fall en förbättring.

För försöken med vindstyrkan 9 m/s kan förhållandet att reduktionen utan bubbelridå är så stor bero dels av den kraftiga turbulens och vågbildning, som sker över dammarna på grund av vinden, dels av att bottenströmmen aldrig hinner utbildas, ty den späds kraftigt under inströmningen och en stor del förs upp till ytan och vidare ut med ytvattnet. Detta senare förhållande kunde mycket tydligt iakttas i en del försök. Se kap. 4.2.

Vid 4 m/s har bubbelridån alltså en viss effekt, som förbättras om luftmängden anpassas så att bubbelridån ger en ythastighet $u_{\max} \approx u_w + 1,4 \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g \cdot h}$, där den sista termen är ythastigheten för optimal luftmängd vid enbart täthetsberoende strömning. Se kap. 3. Reduktionen blir då praktiskt taget opåverkad av vinden.

Vid 9 m/s har bubbelridån till synes endast en ringa effekt, och en ökning till u_{\max} enligt ovan gav ingen förbättring. Men turbulen-

sen i hela "viken" är ju vid denna vindstyrka mycket kraftig och den iakttagna reduktionen tycks ju av försöken utan damm att döma till stor del bero på förhållandena inne i viken. Detta gäller även för försöken med dammarna.

Bubbelridån har enligt våra försök inte någon effekt vid vindstyrkan 9 m/s. Det är dock klart att värdena för 9 m/s måste tydas mycket försiktigt, eftersom vindens inverkan på strömningen i modellen och speciellt dess inverkan på vågbildningen antagligen är större i modellen än i verkligheten. Vågornas våghöjd var i modellen ända upp till 5 cm vilket är $1/6$ av vattendjupet. Detta skulle innebära halv-meterhøga vågor i viken vid denna vindstyrka och landvind. Enl. [6] är den högsta våghöjd η_{\max} som kan uppstå i vikens mynning vid landvind, utan att hänsyn tas till vattendjupet $\eta_{\max} = 0,36 \cdot 0,25 = 0,18$ m.

8.3 Överföring till prototypen

För överföring av de i kap. 8.2 presenterade resultaten från modellen till prototypen tillämpas den i kap. 4.3 föreslagna modellregeln. Modellregeln föreskriver bl. a. att relativa täthetsdifferensen $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ bör vara lika i modell och prototyp för att överföring skall kunna ske. Försöksresultaten visar dock, som antytts i kap. 8.1, att denna parameter är mindre signifikant än de övriga. Kvarstående villkor av betydelse blir då alltså

$$\frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh\right]_m^{1/2}} = \frac{u_w}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh\right]_p^{1/2}} \quad \frac{u_{\max}}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh\right]_m^{1/2}} = \frac{u_{\max}}{\left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh\right]_p^{1/2}}$$

För prototypen är $h \approx 3$ m. I prototypen kommer då för den geometriska likformighetens skull 10 cm och 20 cm dammen i modellen att motsvaras av en 1 m resp. 2 m hög damm. Som illustrerande exempel presenteras här förlängningen av utbytestiden vid vindstyrkan 4 m/s för olika utbytesgrader φ och reduceringsanordningar i nedanstående tabell framräknad ur resultaten i kap. 8.2.

φ %	30	50	70
utan damm	1	1	1
1 m damm	1,7	1,6	1,6
2 m damm	4,1	4,8	7,3
Bubbelridå ($Q = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sm}$)	3,2	3,2	4,7

Vidare är luftmängden Q för dimensionering av kompressor och vindstyrkan w motsvarande 4 m/s i modellen av intresse. I modellen sättes den genomsnittliga täthetsdifferensen $\Delta \rho$ till 0,91 kg/m³ motsvarande en temperaturdifferens om 6°C i temperaturintervallet 11-17°C vid 7% salthalt. I prototypen sker troligen uppvällningen av kallt vatten gradvis, varför temperaturdifferensen i prototypen antagligen blir lägre, förslagsvis 3°C. I temperaturintervallet 14-17°C blir täthetsdifferensen $\Delta \rho$ då 0,51 kg/m³. Vindhastigheten $w = 4$ m/s i modellen ger enl. kap. 3 en ythastighet $(u_w)_m = 0,09$ m/s. Ythastigheten $(u_w)_p$ i prototypen blir då

$$(u_w)_p = (u_w)_m \cdot \sqrt{\frac{(\Delta \rho)_p \cdot h_p}{(\Delta \rho)_m \cdot h_m}} \approx 0,21 \text{ m/s}$$

vilket motsvarar en vindhastighet av 10 m/s i prototypen.

Luftmängden $Q = 2,8 \cdot 10^{-4}$ m³/s motsvarar enligt kap. 3 ythastigheten $(u_{\max})_m = 1,2 (gQ)^{1/3} = 0,17$ m/s. Ythastigheten i prototypen blir då

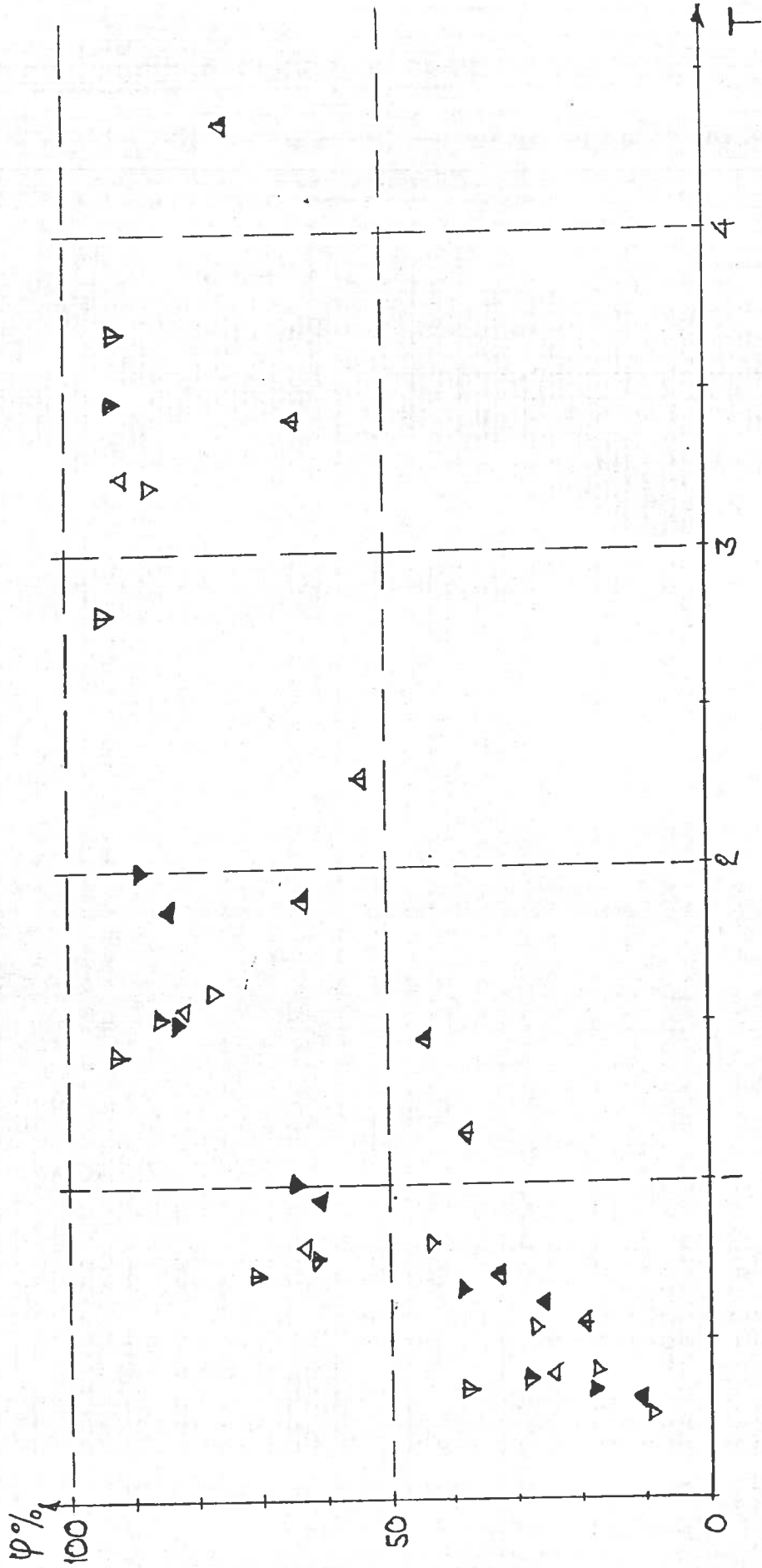
$$(u_{\max})_p = (u_{\max})_m \cdot \sqrt{\frac{(\Delta \rho)_p \cdot h_p}{(\Delta \rho)_m \cdot h_m}} \approx 0,4 \text{ m/s}$$

vilket motsvarar en erforderlig luftmängd om $37 \cdot 10^{-4}$ m³/s m. För en 60 m lång luftbubbelridå i prototypen erfordras en total luftmängd om 13 m³/min. Om temperaturdifferensen endast kommer att uppgå till 2°C sjunker den erforderliga luftmängden till cirka 7 m³/min.

LITTERATURFÖRTECKNING:

1. A. Sjöberg: Reducering av täthetsberoende utbytesströmning med hjälp av luftbubbelridå.
CTH. Inst. för vattenbyggnad. Meddelande nr 40, 1967.
2. Knapp and Baines: Wind Driven Water Currents. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 91 No. HY 2.
3. B. Hällström: Wind Effects on Lakes and Rivers. Ingeniörsvetenskapsakademiens handlingar, Nr 158, Stockholm 1941.
4. G.H. Keulegan: Wind Tides in Small Closed Channels. Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol. 46 No. 5.
5. E. Reinius: Vattenbyggnad del I, hydraulik. Stockholm 1962.
6. Bygg I
8. Utlåtande 30/4 1965 till Söderbygdens vattendomstol: Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.

FÖRSÖK UTAN DAMM

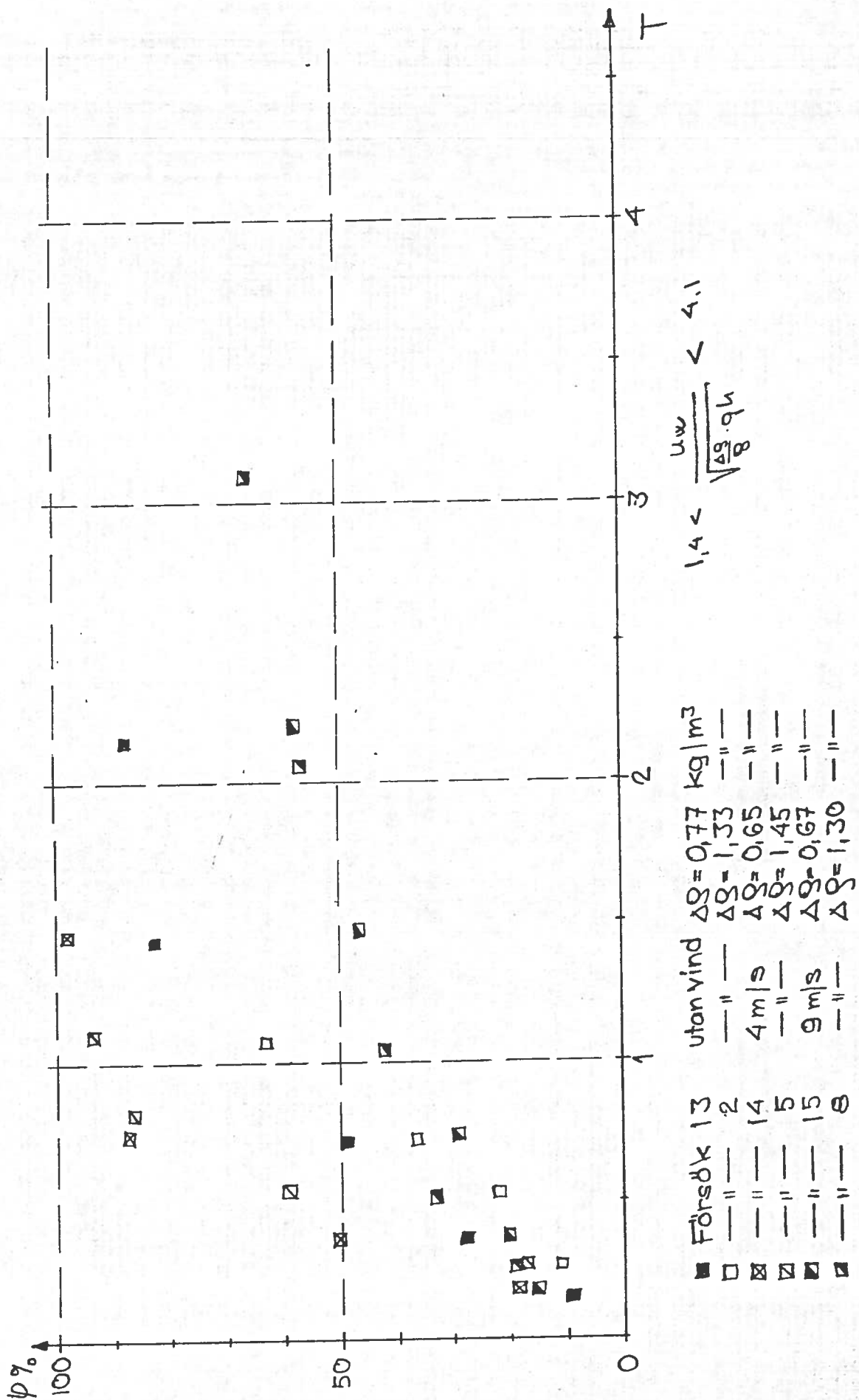


$$1,2 < \frac{u_w}{\sqrt{\frac{2}{\rho} q_h}} < 4,7$$

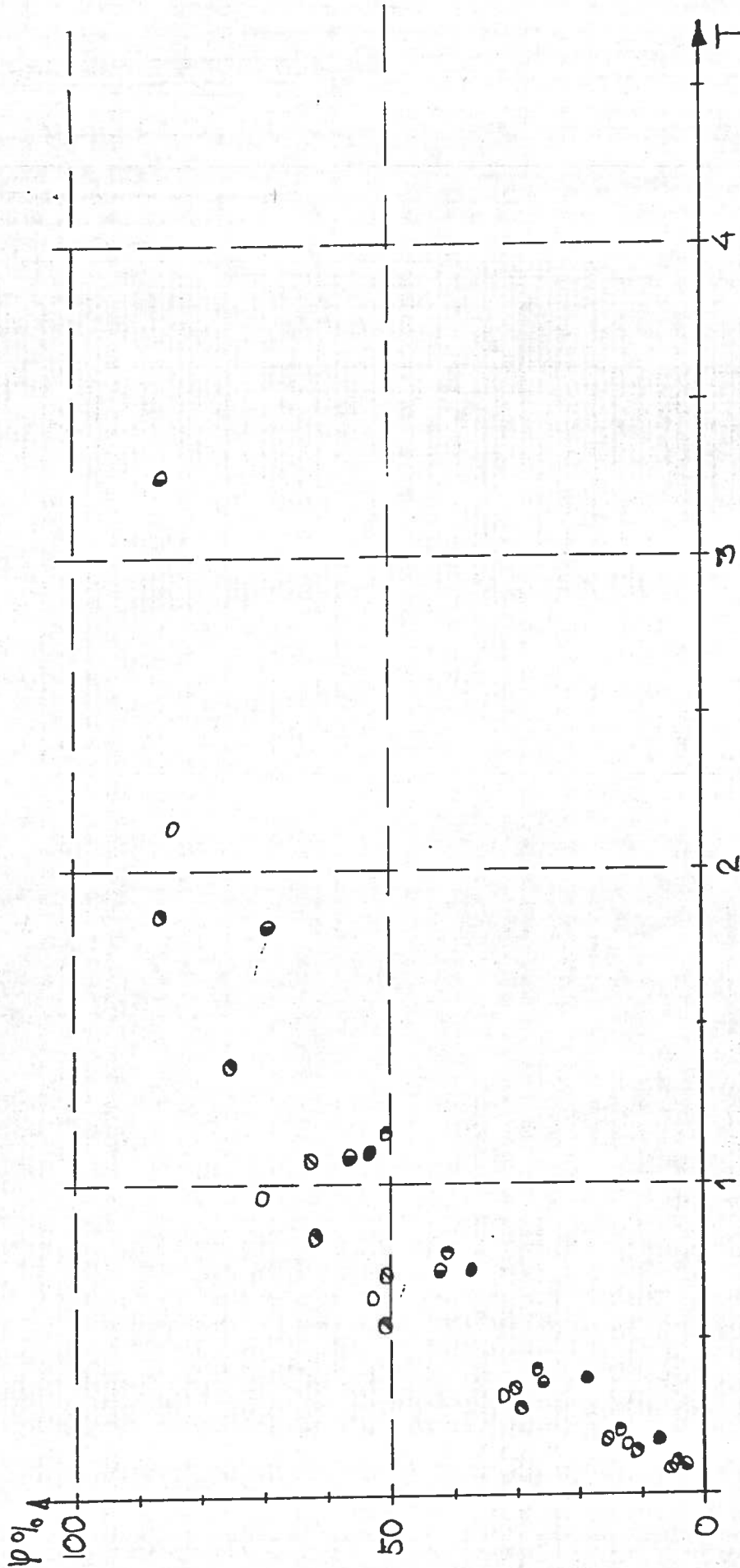
Δ	Försök	10 utan vind	Δq	Δq kg/m^3
▽	"	26	"	"
▲	"	1	"	"
▽	"	27	"	"
▽	"	11	4 m/s	"
▽	"	4	"	"
▲	"	12	9 m/s	"
▲	"	19	"	"

$\Delta q = 0,84$	kg/m^3
$\Delta q = 0,86$	"
$\Delta q = 1,34$	"
$\Delta q = 0,96$	"
$\Delta q = 0,73$	"
$\Delta q = 1,98$	"
$\Delta q = 0,51$	"
$\Delta q = 0,79$	"

FÖRSÖK MED 10CM DAMM

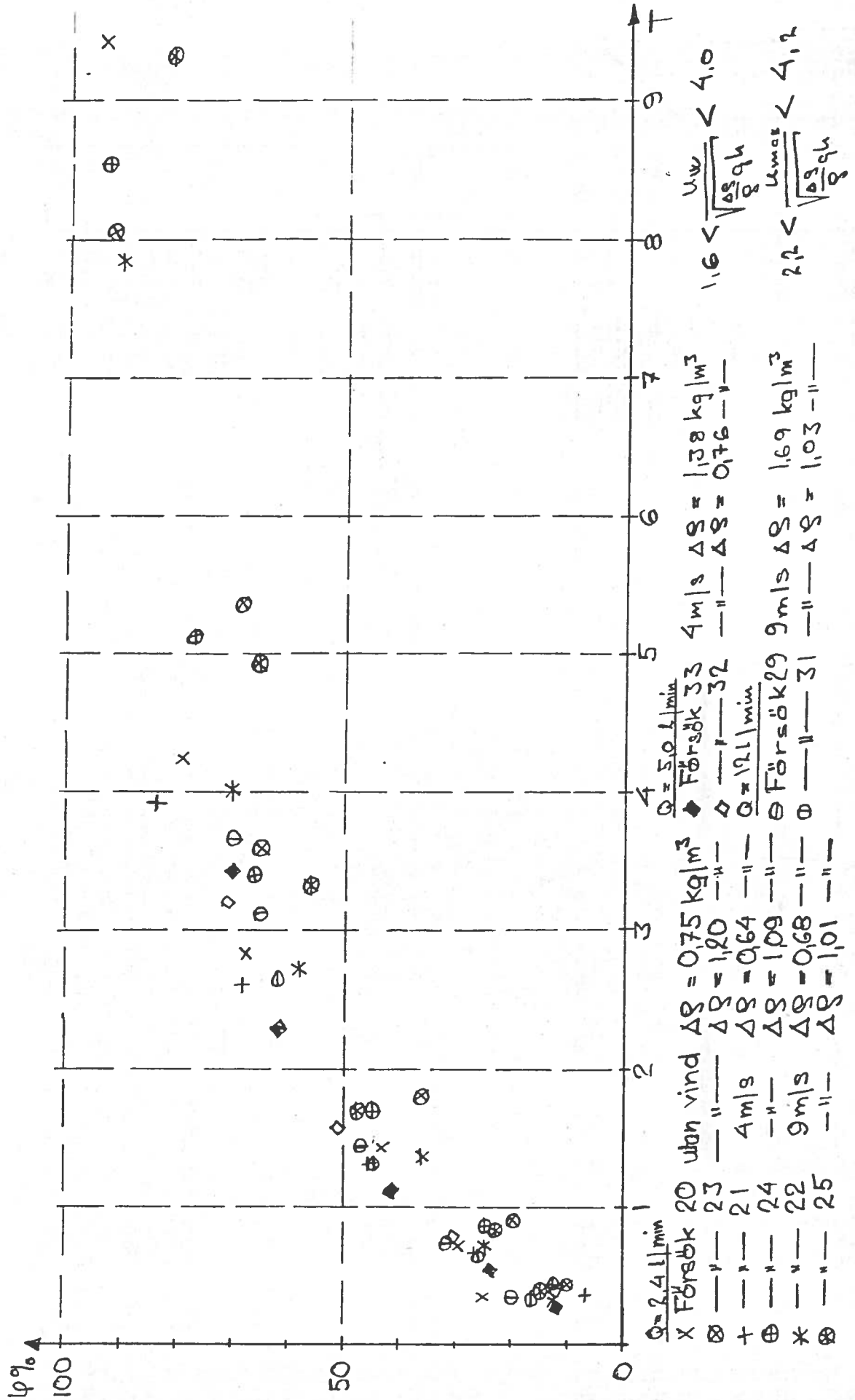


FÖRSÖK MED 20CM DAMM

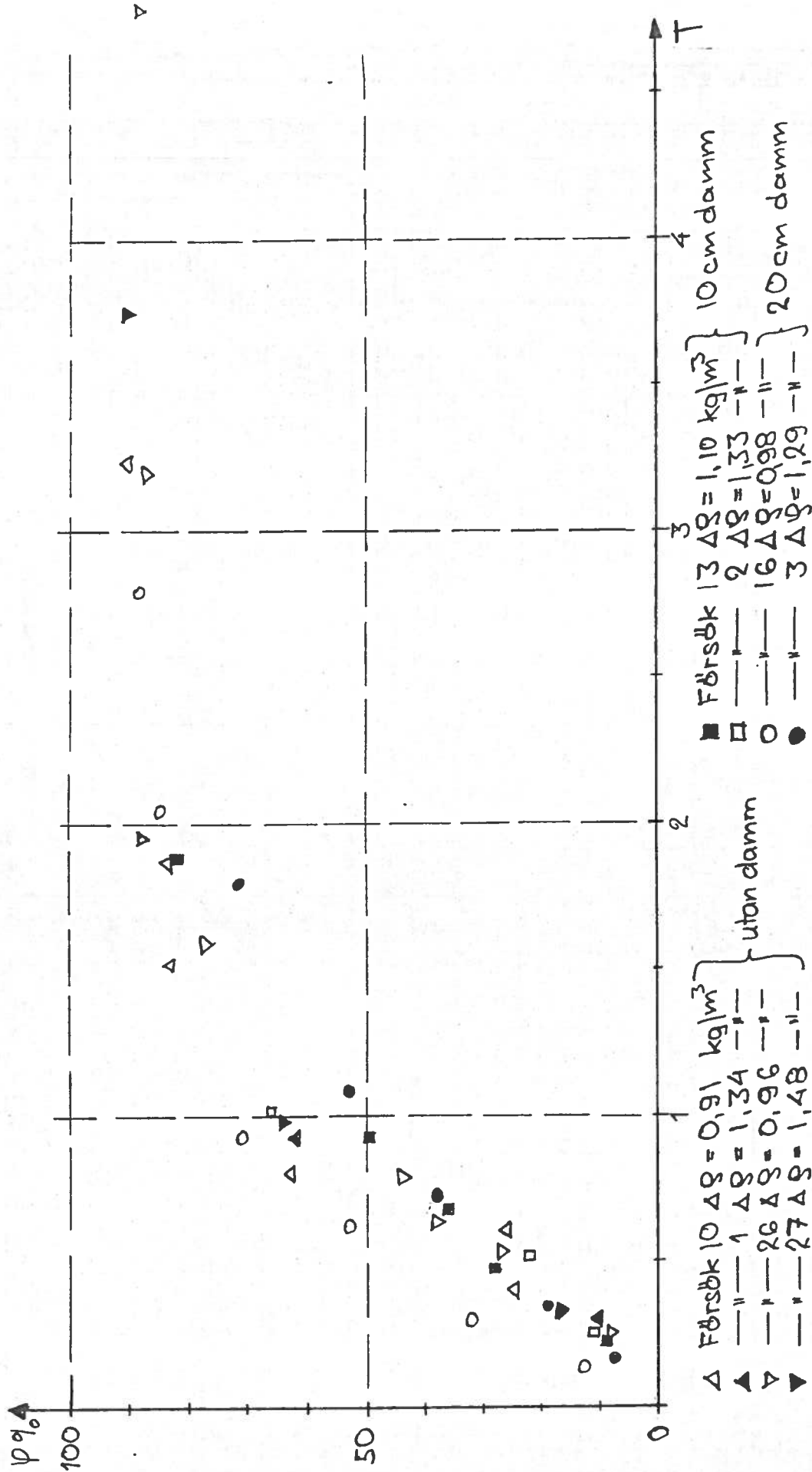


○	Försök	16 utan vind	$\Delta S = 0,98$	kJ/m^3
●	"	3	$\Delta S = 1,29$	"
◐	"	17, 4 m/s	$\Delta S = 0,74$	"
◑	"	6	$\Delta S = 1,21$	"
◒	"	7, 9 m/s	$\Delta S = 1,25$	"
◓	"	18	$\Delta S = 1,40$	"

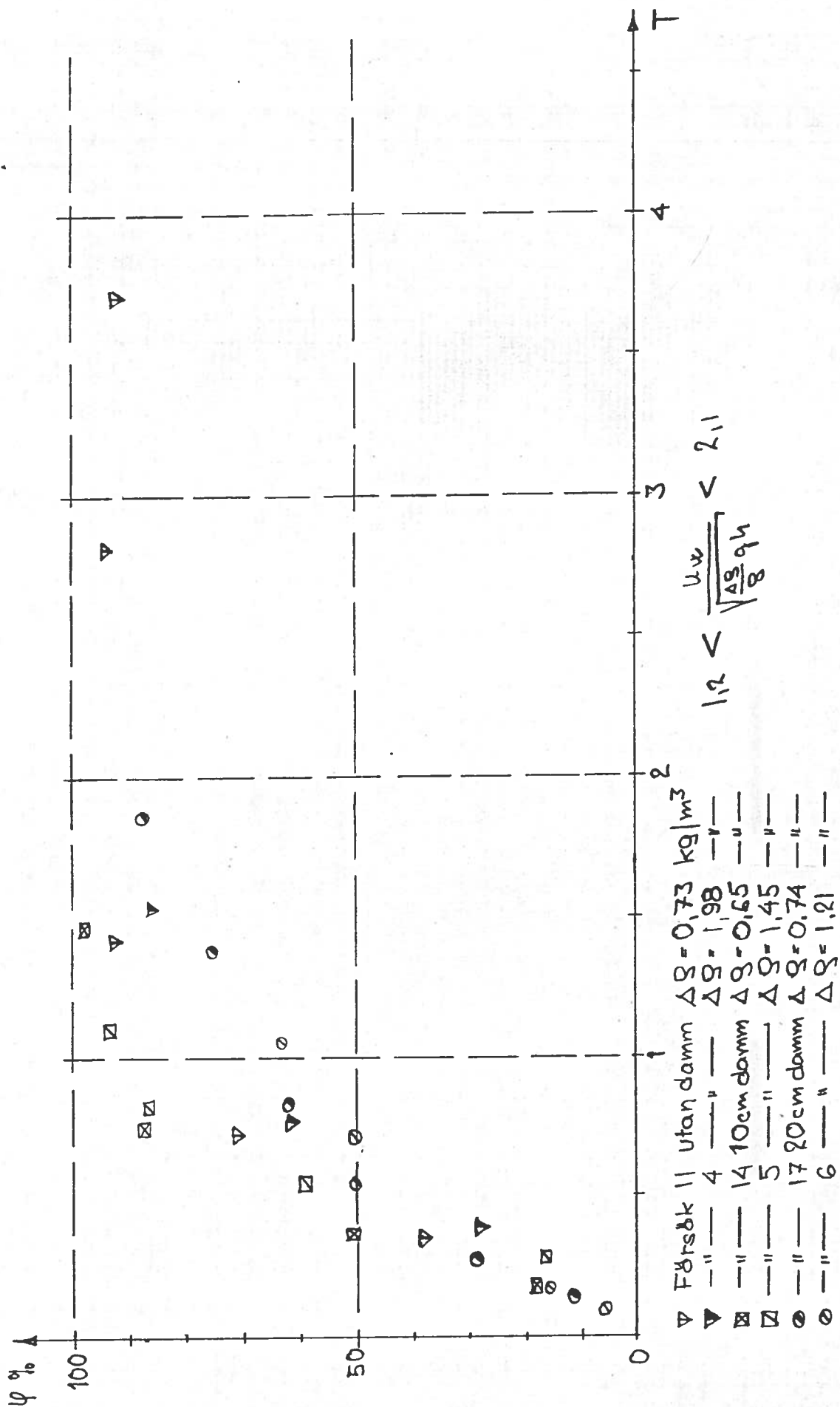
FÖRSÖK MED LUFTBUBBELRIDÅR



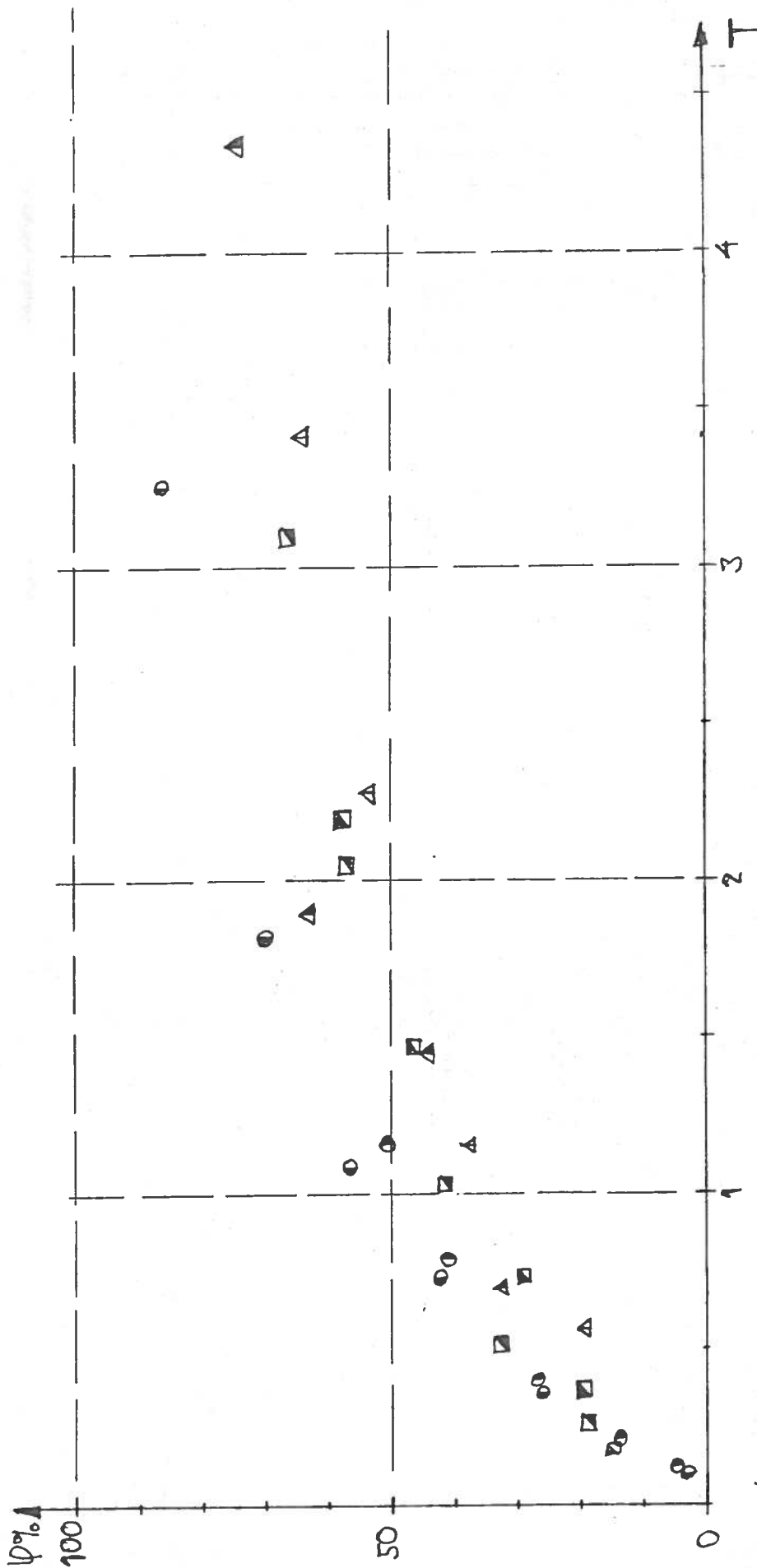
FÖRSÖK UTAN VIND



FÖRSÖK MED VIND 4M/S



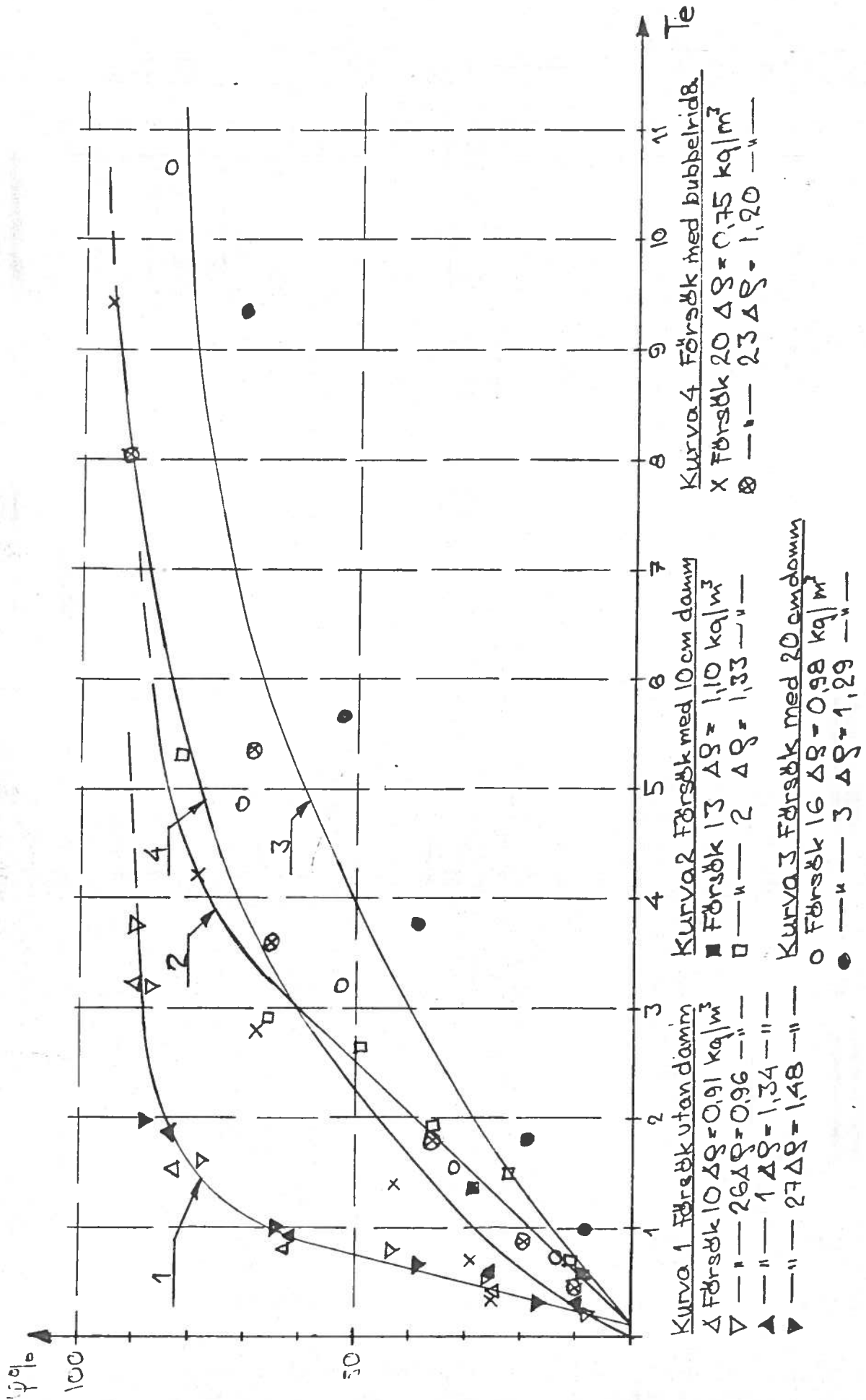
FÖRSÖK MED VIND 9M/S



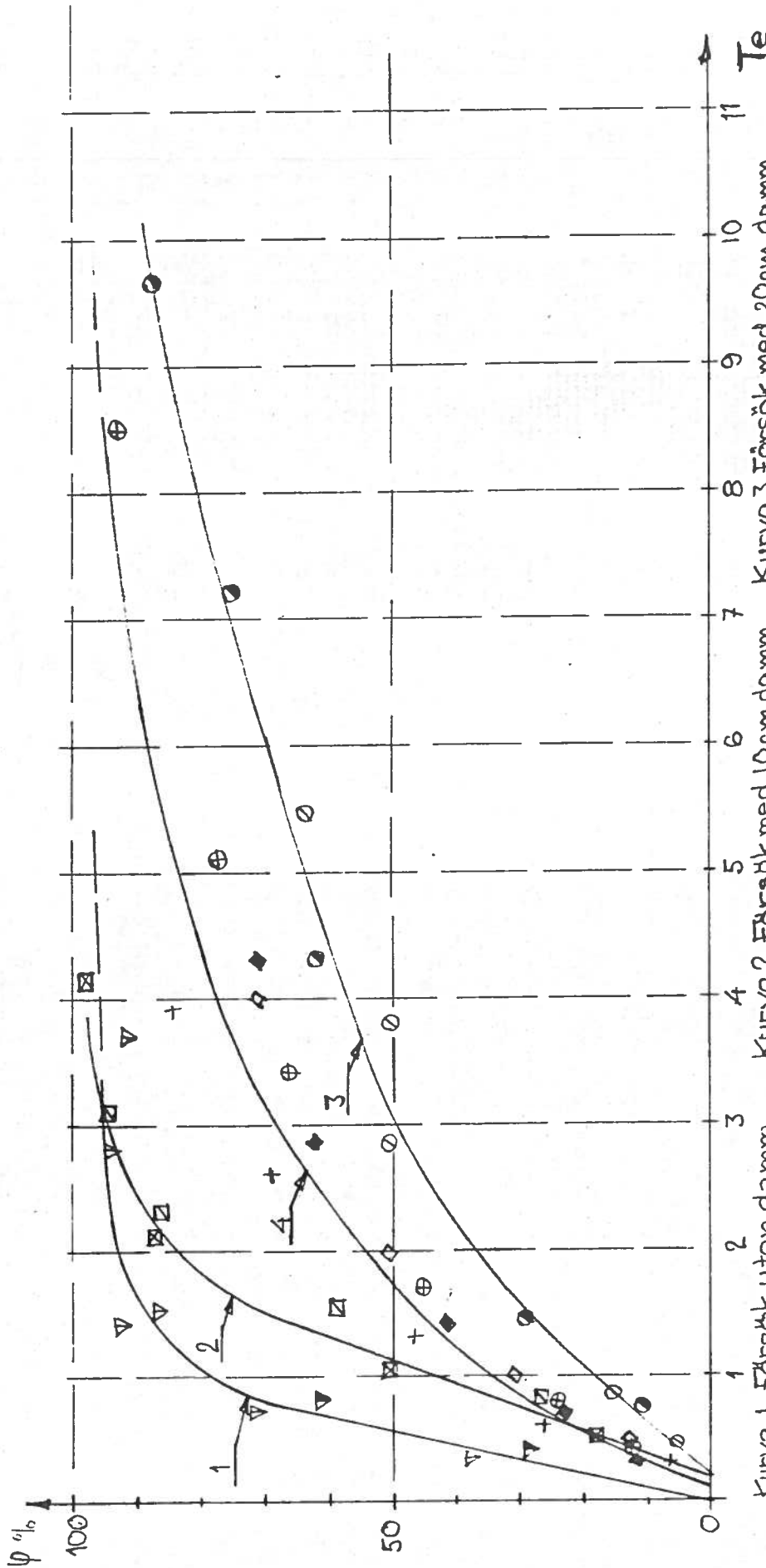
△	Försök	12	utan damm	$\Delta S = 0,51 \text{ kg/m}^3$
△	"	19	"	$\Delta S = 0,79$
▽	"	15	10 cm damm	$\Delta S = 0,67$
▽	"	8	"	$\Delta S = 1,30$
○	"	7	20 cm damm	$\Delta S = 1,25$
○	"	18	"	$\Delta S = 1,40$

$$2,8 < \frac{v_w}{\sqrt{\frac{\Delta S \cdot g \cdot h}{8}}} < 4,6$$

FÖRSÖK UTAN VIND



FÖRSÖK MED VIND 4 M/S



Kurva 1 Försök utan damm
 ▽ Försök 11 $\Delta S = 0,73 \text{ kg/m}^3$
 ▽ — 4 $\Delta S = 1,98$ —
 Kurva 2 Försök med 10 cm damm
 ▫ Försök 14 $\Delta S = 0,65 \text{ kg/m}^3$
 ▫ — 5 $\Delta S = 1,45$ —
 Kurva 3 Försök med 20 cm damm
 ⊕ Försök 17 $\Delta S = 0,74 \text{ kg/m}^3$
 ⊕ — 6 $\Delta S = 1,21$ —

Kurva 4 Försök med luftbubbelridå
 + Försök 21 $\Delta S = 0,64 \text{ kg/m}^3$ } $Q_0 = 2,4 \text{ l/min}$
 ⊕ — 24 $\Delta S = 1,09$ —
 ◆ — 33 $\Delta S = 1,38$ —
 ◇ — 32 $\Delta S = 0,74$ — } $Q_0 = 5,0 \text{ l/min}$

FÖRSÖK MED VIND 9 M/S

