

Examensarbete i vattenbyggnad 1974:8

Studium av energidämpare/avlufare

i fält och laboratorium

av

Jerry Creson Nils-Eric Forslund

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
INTRODUKTION	1
1. FÄLTFÖRSÖK VID STUDSVIK	2
1.1 Allmänt	2
1.2 Utförande och funktion hos energidämpare och avluftare	2
1.3 Anordningar för mätningarnas utförande	3
1.4 Mätmetod	8
1.5 Utvärdering av resultat och slutsatser	9
1.5.1 Allmänt	9
1.5.2 Observationer	10
1.6 Bildbilaga 1	
2. MODELLFÖRSÖK VID CHALMERS	19
2.1 Allmänt	19
2.2 Modellens utförande	19
2.3 Luftbubblors stighastighet i vatten	22
2.4 Modellförsök	25
2.4.1 Bestämning av luftbubblors stighastighet i strömmande vatten	25
2.4.2 Mätning av brunnens avluftningskapacitet	33
2.5 Bildbilaga 2	
3. SLUTKOMMENTARER	39
4. LITTERATURFÖRTECKNING	45

INTRODUKTION

Målsättningen med föreliggande examensarbete är att studera några av problemen kring luftindrivning och avluftning av rörledningar. I ledningar med brant lutning utan nedströms dämning kan vattensprång uppstå om ledningen inte går med full sektion. Vid detta vattensprång sker indrivning av den luft som finns i rörets hjässa. Den indrivna luften inverkar ogynnsamt på ledningens stabilitet om ledningen mynnar under vättnet, varför avluftning ofta bör ske. Detta examensarbete behandlar ovanstående problem och är uppdelat i två moment. Den första delen behandlar problemen med luftindrivning och lösandet av dessa vid en befintlig utloppsledning vid AB Atomenergis kärnkraftlab. i Studsvik.

I den andra delen ges resultat av de modellförsök som gjorts vid CTH i syfte att studera avluftning med hjälp av en cirkulär brunn.

Handledare för examensarbetet har varit civilingenjör C-G Göransson. För uppslaget till examensarbetet tackar vi civilingenjör B. Jansa vid VBB i Göteborg. Ett stort tack riktas även till AB Atomenergi, Studsvik, speciellt till K. Saltvedt och K-E Klevehorn.

Göteborg i juli 1975

Jerry Creson

Nils-Eric Forslund

1. FÄLTUNDERSÖKNING VID STUDSVIK

1.1 Allmänt

Då driften vid Studsviksreaktorn ökades från ursprungligen projekterade 30 MW till 50 MW, medförde detta att större kylvattenmängder fick tagas i anspråk. Under den projekterade driften (30 MW) avleddes kylvattnet genom en $\phi 800$ ledning med längden 300 m och höjdskillnaden 6 m. När kapaciteten ökades uppstod problem hos den del av kylvattenledningen som mynnade under vattenytan.

Den luft i rörhjässan som inpiskats vid vattensprånget i röret minskade tyngden hos vattenmängden och föranledde ett svängningstillstånd i ledningen, samtidigt som det pulserande flödet ledde till att ledningen undergrävdes. För att klara av detta problem har man vid Studsvik byggt en energidämpare och avluftningsbassäng som nu ger en praktiskt taget fullständig avluftning av vattnet. Denna är placerad nedströms ledningens brantaste del innan ledningen löper ut i recipienten.

Den första delen av examensarbetet syftar till att dels klarlägga den avgående luftens fördelning på de olika delbassängerna vid varierande vattenflöde, dels ge visuella iakttagelser av avluftarens verkningsätt. En beräkning av vattensprångets läge vid olika vattenföringar har även företagits.

1.2 Utförande och funktion hos energidämpare och avluftare

Kylvattnet från reaktorn strömmar efter det att det lämnat värmeväxlare och reaktorbyggnader via en $\phi 800$ ledning till en kontrollbassäng för mätning av eventuell radioaktivitet.

Från kontrollbassängen leder en ledning $\phi 800$ i brant lutning ned mot recipienten. Ledningens förutvarande sträckning var rakt ut i östersjöviken Tvären. Avluftningsbassängen lades i vinkelrät riktning mot befintlig utloppsledning, vilken vinklades av med rörkrökar (se figur 1. 1a och b).

Energidämparen och avluftaren är utförd som tre bassänger, vilka benämns bassäng 1, bassäng 2 och bassäng 3 med avseende på deras läge från inloppsledningen räknat.

I bassäng 1 slår det inströmmande vattnet mot bassängens bortre vägg, varvid luften i stor utsträckning avskiljs från vattnet och stiger uppåt medan vattnet rinner nedåt under väggen (se sektion A, fig. 1.2). Vattnet fortsätter därefter till bassäng 2, där ytterligare avluftning sker. En del luft har meddragits hit beroende på storleken av vattenflödet i bassäng 1.

Från bassäng 2 passerar vattnet in i bassäng 3. Strömningsriktningen har då ändrats 90° . I bassäng 3 avlägsnas den återstående luften ur vattnet. Bassängens längd har avpassats så att även luftbubblor med låg stighastighet skall hinna nå vattenytan innan vattnet strömmar vidare ut i utloppsledningen.

Bassäng 3 tillförs även dagvatten ur en i kortsidan inkommande dagvattenledning. Inverkan av denna har helt bortsetts från vid försöken. Bassäng 1 benämnes i fortsättningen energidämpare, bassäng 2 och 3 avluftningsbassänger.

1.3 Anordningar för mätningarnas utförande

För att mäta verkningsgraden hos energidämparen borde mängden insugen luft mätts vid de punkter vilka anges nedan och relaterats till mängden avgående luft vid olika vattenflöden.

Det befanns dock mycket svårt att mäta mängden indriven luft i ledningen på grund av att de ställen där luften drevs in är svåra dels att täcka över och dels att placera lämpliga mätanordningar vid. I stället mättes mängden avgående luft vid energidämparen och bassäng 2. Luftmängden relaterades till aktuellt vattenflöde. Vattenflödet kunde varieras godtyckligt. Avluftningen i konstruktionen kan anses vara fullständig. De punkter där luftindrivning skedde på ledningen efter reaktorbyggnaden var (se fig. 1.1 b):

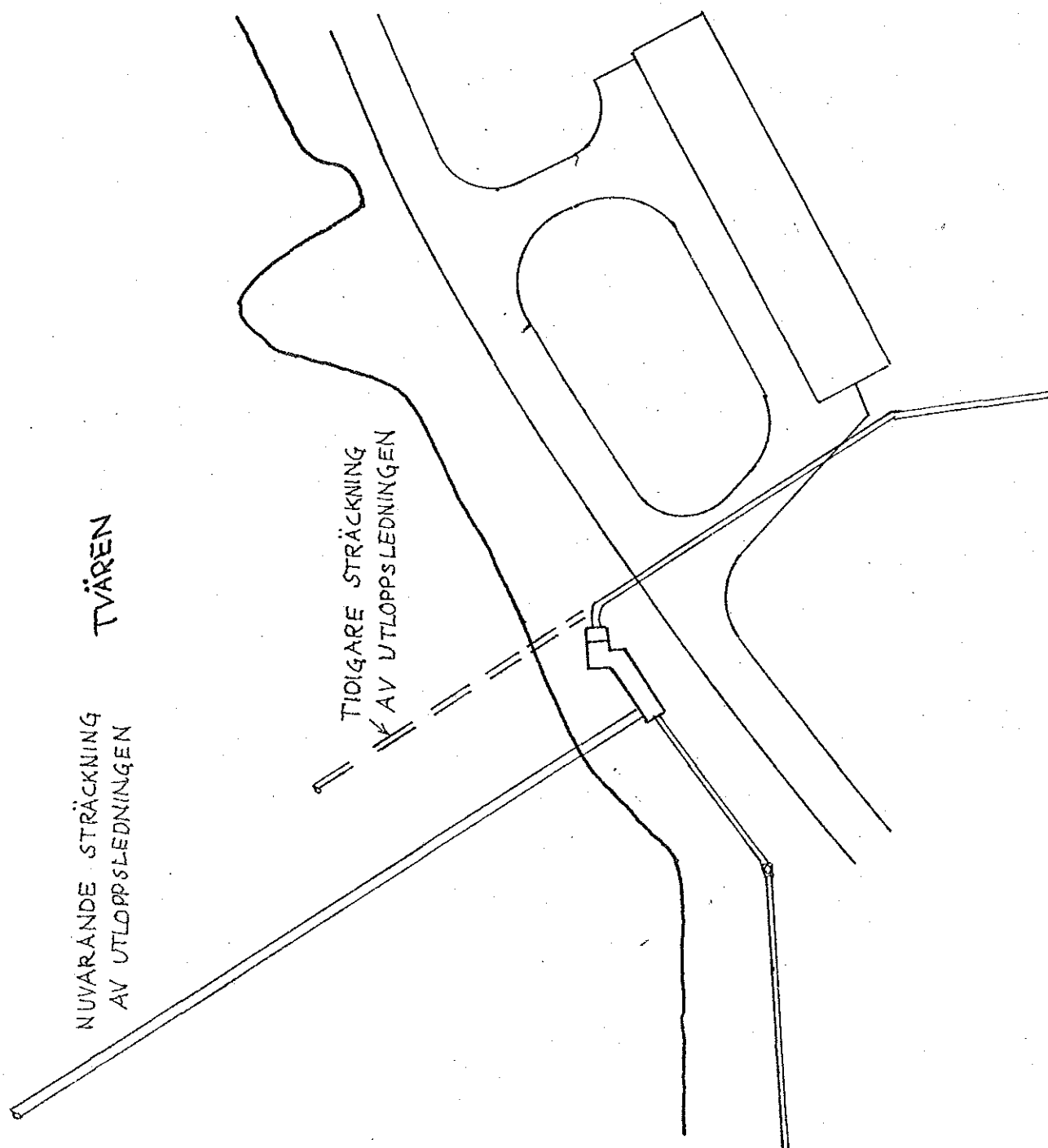
a) Plugg i nedströmsänden på venturikanalen vid kontrollbassängen.

Venturikanalen löper längs kontrollbassängen.

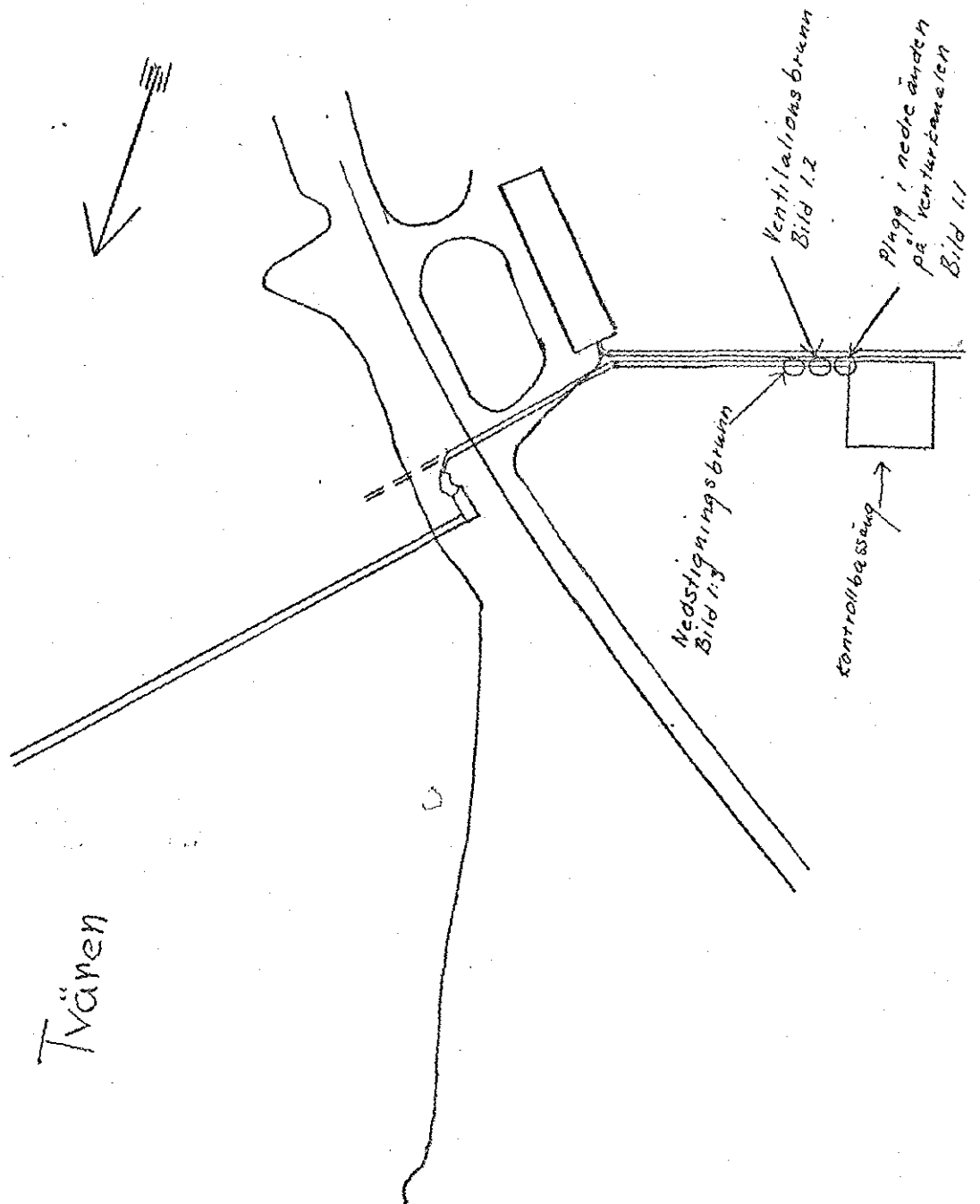
Vid radioaktivitetspåvisande i vattnet faller denna plugg ner och stänger utloppsledningen.

Vattnet rinner då över kanalens kant och ner i kontrollbassängen.

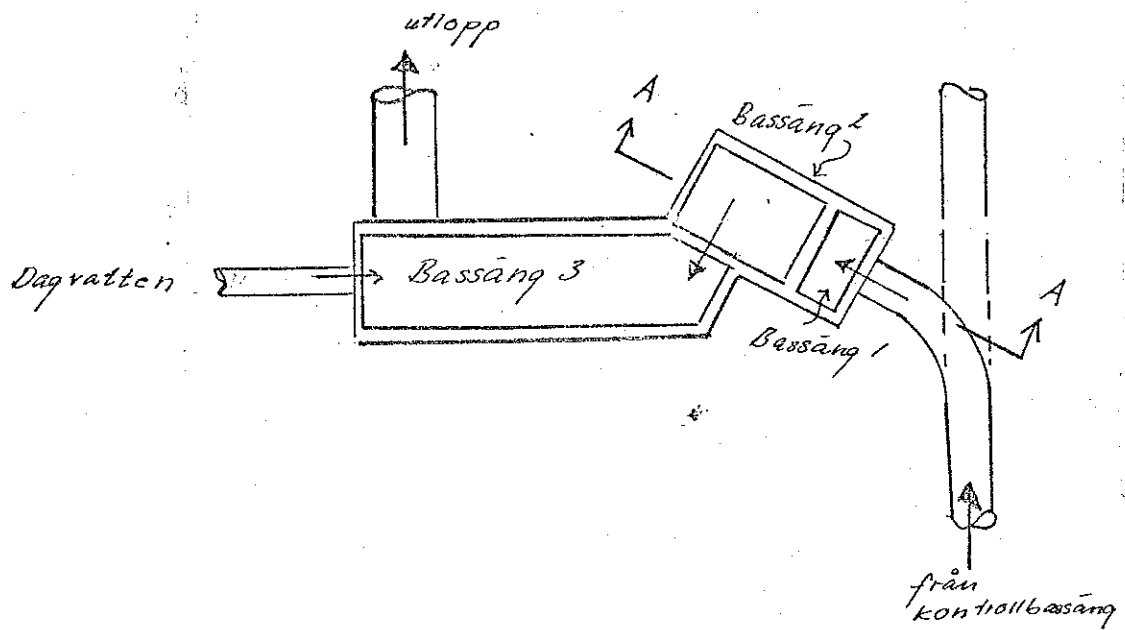
Vid denna plugg bildas en virvel som suger med sig luft. Då det var svårt att täcka över kanalen gjordes dock inga mätningar av insugen luft här (se bild 1.1).



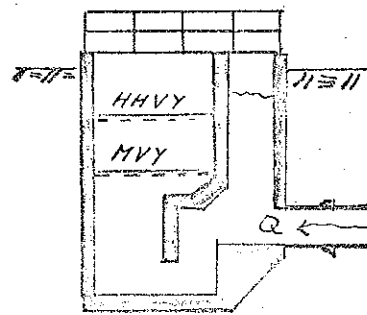
FIGUR 1.1A



Figur 1.1B



Sektion A-A



- b) Nedströms i en i anslutning till kontrollbassängen belägen ventilationsanordning för ledningen. Vid denna ventilationsanordning pulserade luftflödet, dvs det skedde både insugning och utblåsning av luft. Röret övertäcktes med plast (se bild 1.2).
- c) Nedströms kontrollbassängen belägna nedstigningsbrunnar.

Samtliga brunnar och ventilationsanordningar i anslutning till brunnarna övertäcktes (Se bild 1.3).

Anordningar för mätning av avgående luft: Bassäng 1 (energidämparen) och bassäng 2 övertäcktes med spånplattor. Dessa tätades med kitt mot bassängkanten samt sinsemellan med plasttejp. Denna övertäckning befanns vara helt lufttät (bild 1.4).

Bassäng 3 övertäcktes ej. Bakgrunden till detta var:

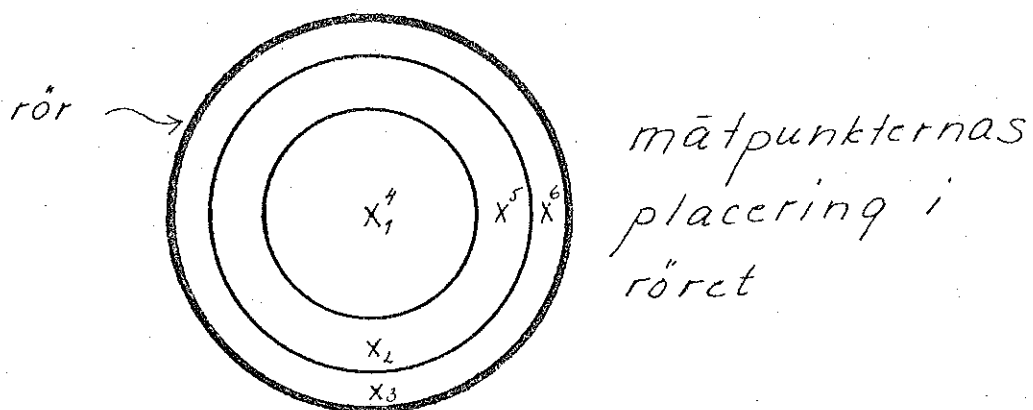
- 1) Utloppsledningen står i direkt förbindelse med en havsvik, Tvären. Beroende på snabba vattenståndsfluktuationer där, s k seicher, svänger hela tiden vattenytan uppåt och neråt i bassängen. Tvärens nivåvariationer medför att en luftmängd skulle ömsom pressas ut ömsom sugas in genom mätålet i övertäckningen. Denna luftmängd har inget samband med den som ursprungligen avsetts mätas, dvs det luftflöde som avgår i bassäng 3.
- 2) Den luftmängd som återstod i vattnet efter att det passerat bassäng 1 och 2 var så liten att den inte gick att mäta med de instrument som fanns.

Håltagningarna utfördes i två av spånplattorna, $\phi 195$ i bassäng 1 och $\phi 100$ i bassäng 2. I dessa hål anbringades rör med motsvarande diameter. Dessa tätades väl mot plattorna. Rören hade två hål borrarade radiellt i vinkelrät riktning mot varandra där pitotrören stacks in. Slutligen placerades tyngder längs plattornas kanter så att tätningen blev bästa möjliga samt även av den anledningen att det vid höga flöden uppstod en kraftig luftström, vilken annars skulle lyfta plattorna.

1.4 Mätmetod

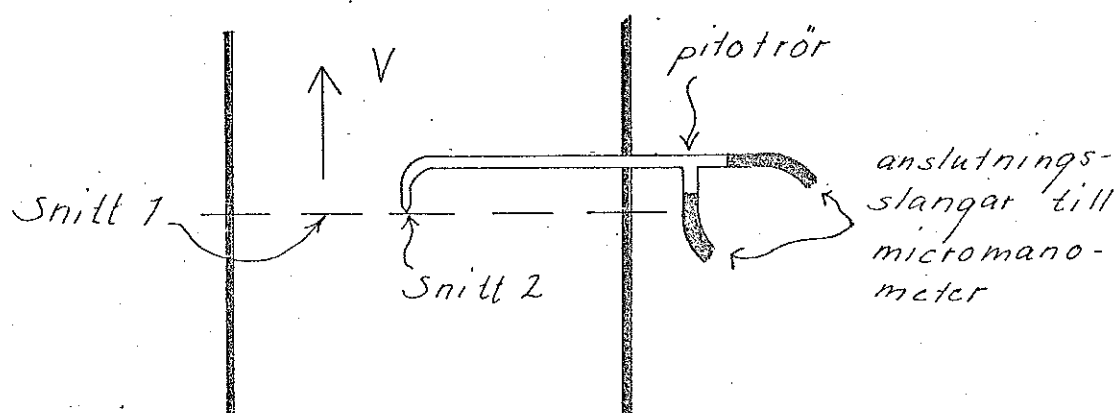
Mätningarna av luftflödet gjordes med pitotrör kopplade med gummislangar till micromanometrar (se bild 1.5). Då luftflödet pulserade kraftigt ströps slangarna med slangklämmor, detta för att utslagen på micromanometrarna skulle kunna avläsas lättare. Vattenflödet avlästes på en flödesmätare i venturikanalen vid kontrollbassängen.

Metodik: Vattenflödet hölls konstant under en längre tid, ca 1/2 tim, varefter flödesmätaren avlästes. Pitotrören infördes i $\phi 195$ -röret på bassäng 1 och $\phi 100$ -röret på bassäng 2. Luftflödet mättes i två radiella riktningar vinkelräta mot varandra, i vardera röret, sammanlagt sex mätpunkter i varje rör.



Mätmetodens teori:

Härledningen genomföres utgående från Bernoullis ekv: $\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{konst.}$



1 betecknar snitt 1, 2 snitt 2.

$$\left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_1 = \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right)_2$$

$$z_1 = z_2$$

$v_1 = v$ lufthastigheten i röret

$v_2 = 0$ övertrycket Δp i micromanometern gör att ingen luft kan passera in i pitotröret

$$p_2 - p_1 = \Delta p = \Delta h_s \rho_s \cdot g = \Delta h_l \rho_l \cdot g, \text{ s resp l betecknar sprit resp luft}$$

Genom ovanstående fås:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{p_2 - p_1}{\rho_l g} = \frac{\Delta p}{\rho_l \cdot g} = \frac{\Delta h_l \cdot \rho_l \cdot g}{\rho_l \cdot g} = \Delta h_l$$

Lufthastigheten v är

$$v = \sqrt{2g \Delta h_l}$$

Δh mäts i mm luftpelare då det gäller luft. Om mätning av tryckdifferensen sker med sprit fås i stället

$$v = \sqrt{2g \Delta h \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l}}$$

Luftflödet fås som $q = \sum v \cdot A$

För att undvika inströmningsfenomen vid rörens ändar valdes rörlängden till 5 - 15 x diametern.

1.5 Utvärdering av resultat och slutsatser

1.5.1 Allmänt

Mätningarna utfördes under provkörningsskedet av reaktorn. Tillfälle gavs till tre mätningar, en vid variation av pumparna oberoende av reaktorn samt två under uppstartning av reaktorn.

Mätning 1. Denna var den mest omfattande. Endast pumparna kördes då och flödet kunde varieras godtyckligt.

Mätning 2. Vattenflödena bestämdes av reaktordriften. Denna mätning fick avbrytas då driftsstörning i reaktorn inträffade.

Mätning 3. Uppstartning av reaktorn, från 0 MW till kontinuerlig full drift, 50 MW. Vattenflödena bestämdes även här av reaktordriften.

1.5.2 Observationer

En uppdelning enligt nedan i olika vattenflödesintervall, där intervallgränserna bestäms av karakteristiska händelser i de olika bassängerna ger bäst överblick av undersökningsresultaten.

Vattenflödet 200 - 500 l/s

Mätbara luftmängder uppkom först i bassäng 2 vid samtliga mätningar (se diagram 1.1, 1.2, 1.3). Först vid vattenflöden omkring 450 l/s var luftavgången i bassäng 1 lika stor som i bassäng 2.

Vid ett vattenflöde på omkring 350 l/s började bassäng 2 att "andas". Övertäckningsskivorna höjde och sänkte sig i lugn regelbunden takt. Bassäng 1 började fungera som avluftare vid ett vattenflöde på omkring 450 l/s och ungefär samtidigt upphörde bassäng 2 att andas. Luftflödet i bassäng 1 och 2 började att pulsera då luften kom i kraftiga luftstötter.

Luft börjar att inpiskas i vattensprånget vid Froudes tal större än 2,4 enligt [1]. (Froudes tal är definierat som $v/\sqrt{g y_e}$, där v är vattenhastigheten, g jordaccelerationen och y_e är effektiva djupet d v s vattenarean dividerad med omkretsen).

Vid vattenflöden mellan 450 - 500 l/s är Froudes tal omkring 10, alltså betydligt större än 2,4. Det visar sig vid jämförelse med [1] att den luftmängd som inpiskas i vattensprånget vid vattenflödet 450 l/s understiger vattenflödets transportkapacitet. Detta medför att en luftficka uppstår efter vattensprånget. Denna sträcker sig periodvis fram till rörmynningen i bassäng 1 och ger upphov till det pulserande luftflödet.

Vid små vattenflöden i vårt fall 200 - 450 l/s uppstår däremot inte en enda lång luftficka nedströms vattensprånget, utan luften transporteras istället av en serie luftbubblor. Stighastigheten hos de bubblor som bildas är beroende av dess storlek och kan beräknas med Stoke's lag.

Då vattenflödet understeg 450 l/s erhöles ingen mätbar luftmängd i bassäng 1. Detta beroende på att luftflödet var så litet att luften transporterades i form av små bubblor. Storleken hos dessa luftbubblor var så

liten att de ej hann stiga upp till ytan i bassäng 1. Bubblorna dras istället med av vattnet till bassäng 2, vars längd är tillräcklig för att de största bubblorna skall hinna avluftas där. De minsta bubblorna avluftas i bassäng 3. Denna luftmängd var dock så liten att den ej var mätbar.

Vattenflödet 500 - 950 l/s

Vid ett vattenflöde omkring 700 l/s var turbulensen så kraftig i bassäng 1 att vatten sprutade upp genom mät hålet i övertäckningsskivan. Då flödet var omkring 850 l/s upphörde bassäng 1 att pulsera. Luftavgången och vattenturbulensen var då så stor att ytterligare belastning måste påföras övertäckningen för att denna inte skulle lyfta. Vid detta vattenflöde kunde luftstötarna inte särskiljas utan de bidrog till ett kontinuerligt luftflöde, vilket torde bero på att vattensprånget ligger inne i bassäng 1 (se beräkning nedan). De av vattnet i bassäng 1 inmatade luftbubblorna splittrades mot bortre väggen i bassäng 1. Dessa avgick dels direkt till atmosfären och dels p g a turbulens åter till vattnet i form av mindre bubblor vilka avluftades i bassäng 2 och 3.

Vid vattenflöden större än 700 l/s var strömningen i bassäng 2 så stor att ett skumskikt bildades på ytan. I bassäng 3 kunde liknande luftskum iakttagas vid den bassängkant som gränsar till bassäng 2 (se bild 1.6). Luftbubblorna avtog sedan mot utloppet i bassäng 3. All luft som inpiskats vid vattensprånget i rörledningen hade således avluftats i bassäng 1, 2 och 3. Luftavgången i bassäng 1 ökar med ökande vattenföring. Detta beroende på att dess utformning som energidämpare kommer till sin rätt, (se diagram 1.1, 1.2 och 1.3). I bassäng 2 ökar däremot inte luftavgången något nämnvärt över ett vattenflöde på 700 l/s. Detta torde bero på att vattenhastigheten och turbulensen är så stor i bassäng 1 att de minsta bubblorna som inpiskas där är så små och deras stighastighet så liten att de ej hinner stiga upp till ytan i bassäng 2.

Stora luftbubblor och "luftfickorna" avluftas genomgående i bassäng 1 oavsett vattenföring. I bassäng 2 däremot sker avluftningen av bubblorna inom ett visst storleksintervall och uppehållstiden för vattnet blir därigenom av större betydelse. Vid ökad vattenföring ökar visserligen luftinnehållet i vattnet vid mynningen till bassäng 2, men samtidigt minskar uppehålls-

tiden. Vid större flöden, ca 700 l/s och mer, tycks dessa båda effekter balansera varandra så att luftavgången blir mer eller mindre konstant oavsett vattenföringen.

Det pulserande luftflödet för vattenflöden mindre än 850 l/s kan förklaras som följer.

Enligt [1] finns ett kritiskt värde på Froudes tal då den luftmängd som inpiskas i vattensprånget motsvarar den luftmängd vilken kan transporteras med av vattnet nedströms vattensprånget. Överskrides lufttransportkapaciteten för röret bildas en stor bubbla efter språnget. Denna sträcker sig dock ej till rörmynningen nedströms. Från denna stora bubbla kan små bubblor lösryckas och medtransporteras av vattnet. Den stora bubblan som ligger still kommer att periodiskt "blåsa ut" över vattensprånget, på så vis kommer detta att flytta sig nedströms och ett nytt vattensprång uppkommer. De pulser som förekommer i bassäng 1 beror troligtvis på detta fenomen. Övergången från pulserande till kontinuerligt luftflöde vid ett vattenflöde omkring 850 l/s kan förklaras enligt nedan:

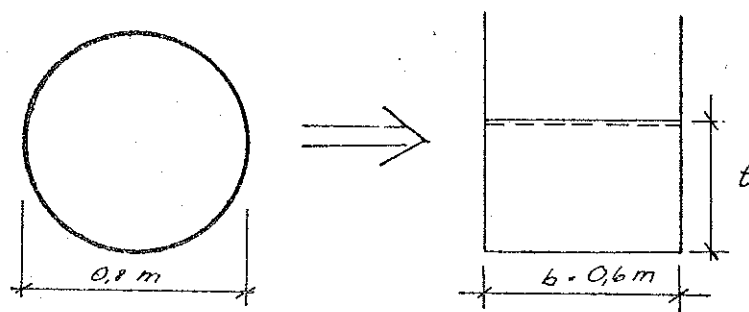
Betrakta den brantast lutande delen av rörledningen innan bassäng 1.

$$\left. \begin{array}{l} \text{längd } 8,2 \text{ m} \\ \text{höjdskillnad } 6,57 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow I = \frac{6,57}{8,2} = 0,801$$

Mannings formel för friktionsförluster ger

$$\text{lutningen } I = \frac{h_f}{L} = \frac{V^2}{M^2 \cdot R^{4/3}} \Rightarrow V = I^{1/2} \cdot M \cdot R^{2/3}$$

Rörtvärsnittet approximeras med ett rektangulärt tvärsnitt med bredden 0,6 m och fyllnadsgraden t .



$$\text{flödet } Q = 0,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = v \cdot A = I^{1/2} \cdot M \cdot R^{2/3} \cdot b \cdot t \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{Hydrauliska radien } R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot t}{2t+b} \quad \dots\dots (2)$$

Ins. av (2) i (1) ger:

$$\begin{aligned} Q &= I^{1/2} \cdot M \sqrt[3]{\frac{b^2 \cdot t^2}{(2t+b)^2}} \cdot b \cdot t = \\ &= I^{1/2} \cdot M \sqrt[3]{\frac{b^5 \cdot t^5}{(2t+b)^2}} \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

Mannings tal (betongrör), $M \approx 80$

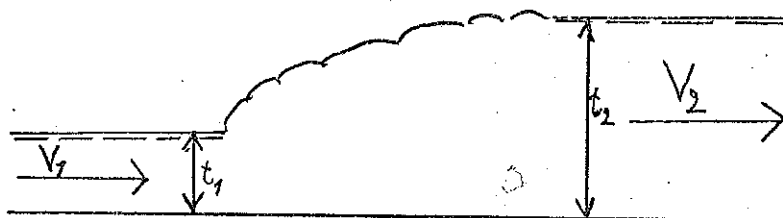
Då fås med insättning av kända parametrar i (3)

$$Q = \sqrt{0,801 \cdot 80} \cdot \sqrt[3]{\frac{6^5 t^5}{(2t+b)^2}} = 30,5 \sqrt[3]{\frac{t^5}{(2t+0,6)^2}}$$

Med hjälp av passningsräkning fås t ur ovanstående formel till 0,11 m.

Arean $A = b \times t = 0,6 \cdot 0,11 = 0,066 \text{ m}^2$.

Betrakta ett vattensprång



t_1 är det t vi räknat ut genom ovanstående formel, således $t_1 = 0,11 \text{ m}$.

Vid rektangulär tvärsektion och horisontell botten gäller om friktionsförlusterna försummas.

$$t_2 = -\frac{t_1}{2} + \sqrt{\frac{t_1^2}{4} + \frac{2}{g} V_1^2 \cdot t_1} \quad \dots\dots (4)$$

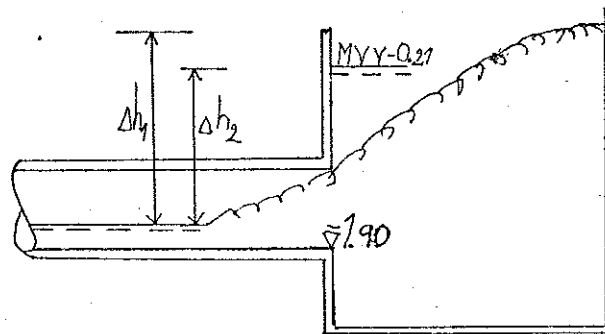
$$V_1 = \frac{0,85}{0,066} = 12,88 \text{ m/s}$$

Insättning av t_1 och V_1 i (4) ger:

$$t_2 = -\frac{0,11}{2} + \sqrt{\frac{0,11^2}{4} + \frac{2}{9,81} \cdot 12,88^2 \cdot 0,11} = 1,87 \text{ m}$$

$$\Delta h_1 = t_2 - t_1 = 1,76 \text{ m}$$

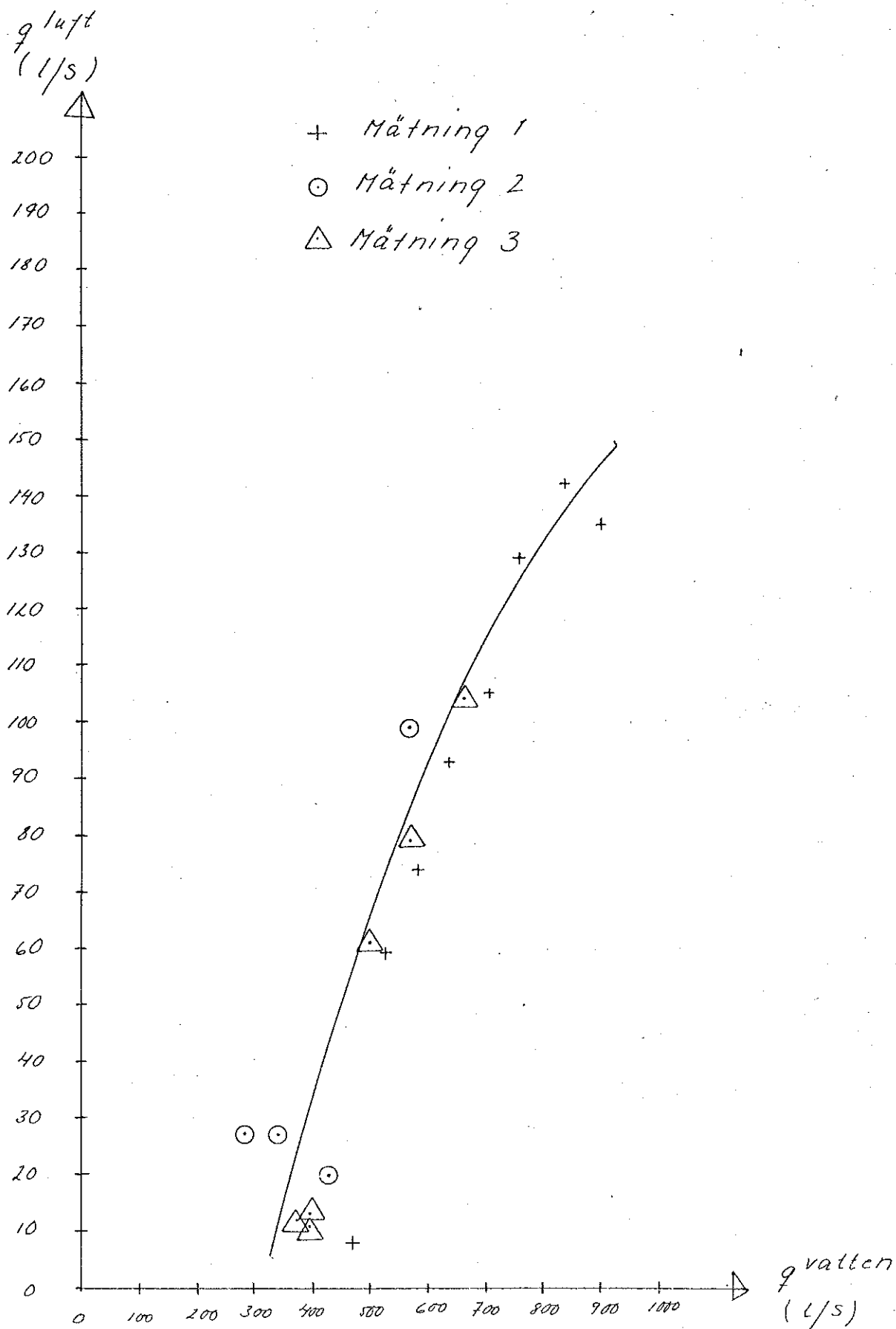
Betrakta bassäng 1:



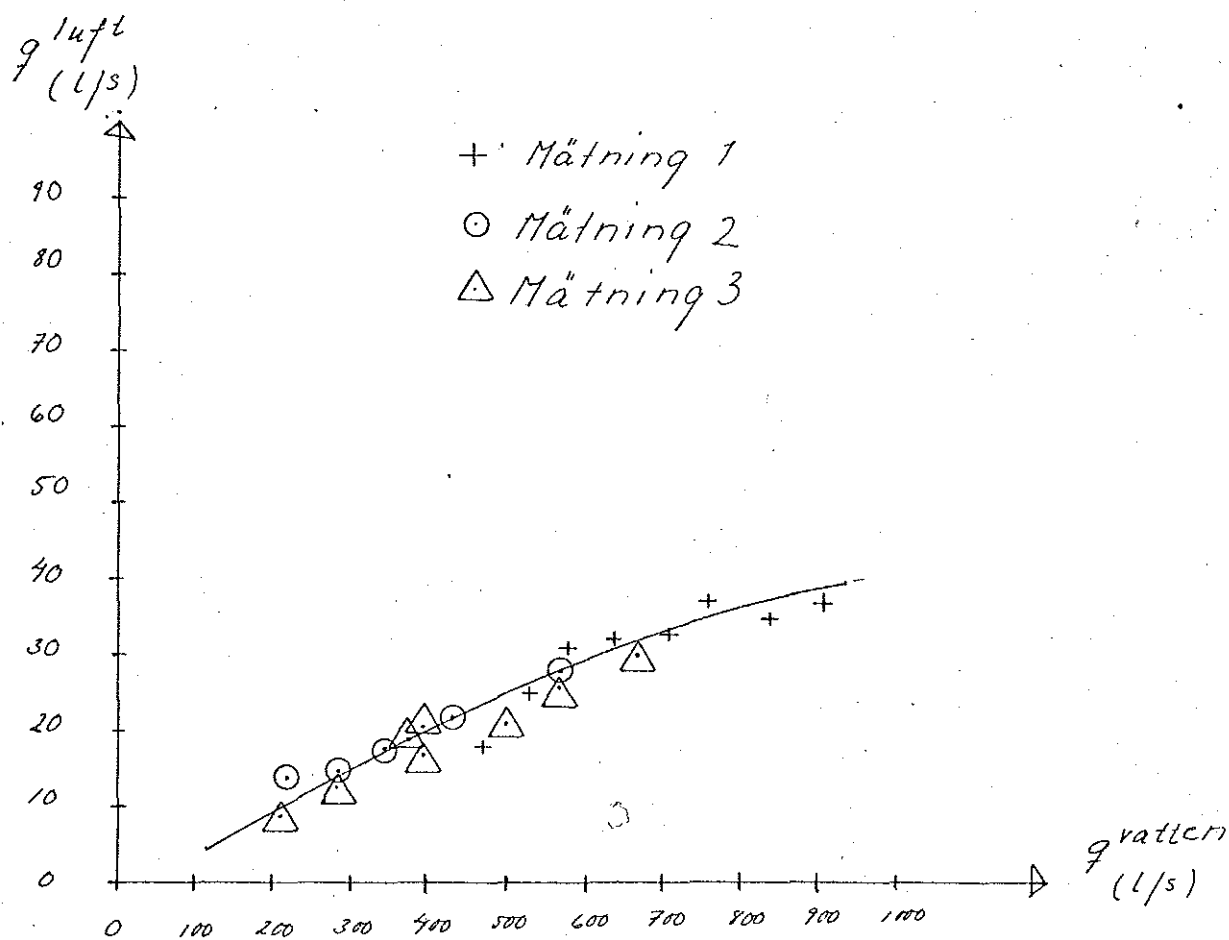
Om $\Delta h_1 > \Delta h_2$ medför detta att språnget kommer att ligga i bassäng 1. Då språnget ligger i bassäng 1 uppkommer inga pulser, utan luftflödet blir kontinuerligt. $\Delta h_2 = \Delta h +$ förluster i utloppsledningen. Vid beräkning av förlusterna i utloppsledningen med Mannings formel visar sig dessa vara av storleksordningen 0,05 m (850 l/s).

$\Delta h_2 = 1,59 + 0,05 = 1,64 \text{ m}$. Då Δh_1 är 1,76 m och Δh_2 är 1,64 m vid vattenflödet 850 l/s medför detta att vattensprånget ligger i bassängen, varför inga pulser i luftflödet uppkommer.

$$q^{luft} = f(q^{vatten})$$



$$q_{\text{luft}} = f(q_{\text{vatten}})$$



1.6 BILDBILAGA I



Bild 1.1

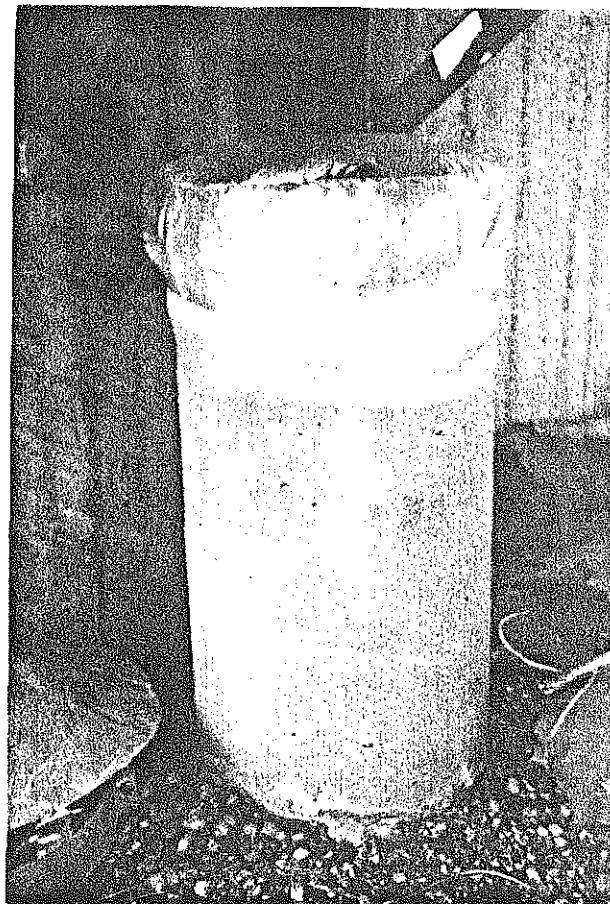


Bild 1.2

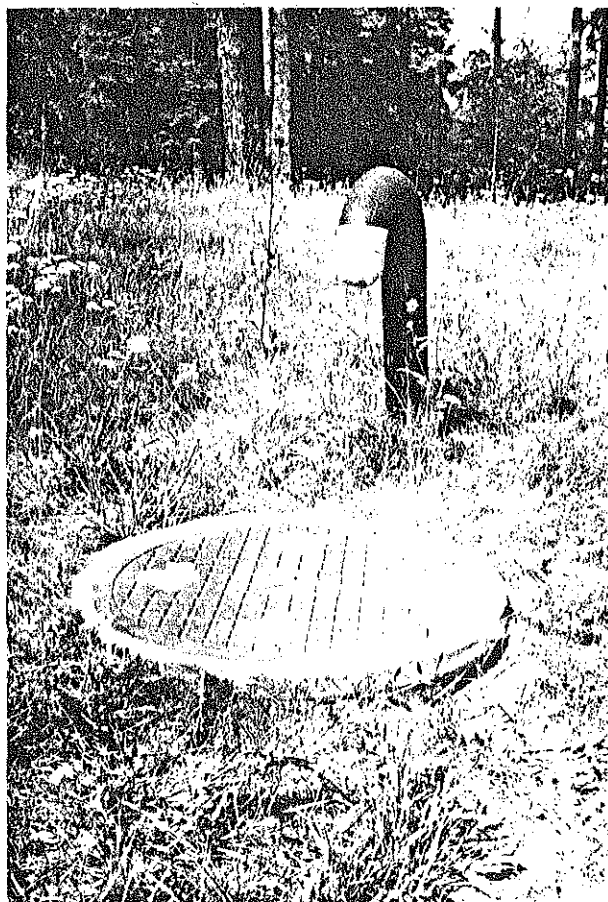


Bild 1.3

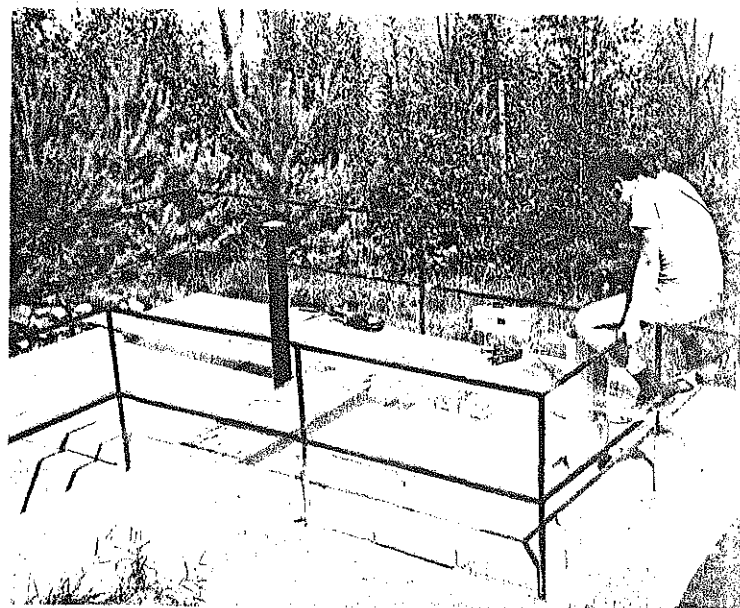


Bild 1.4

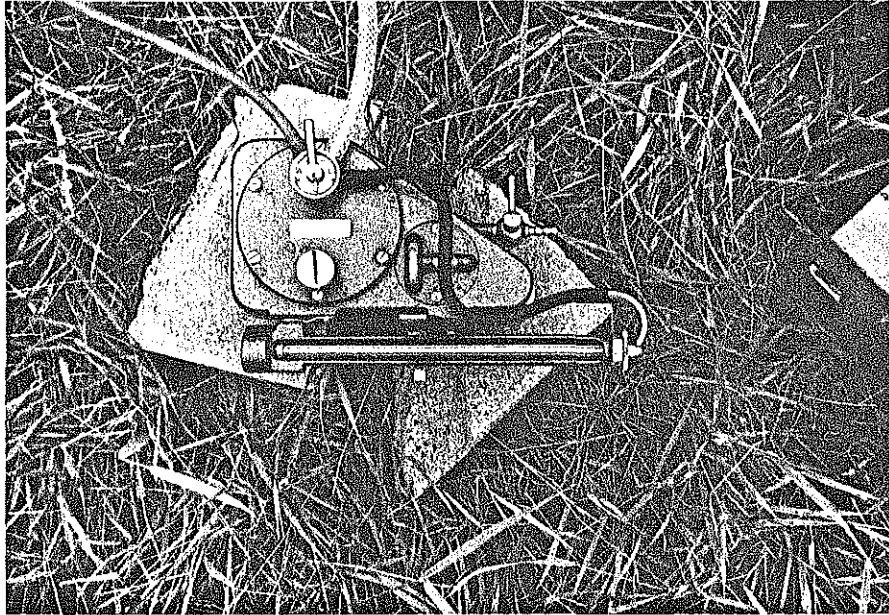


Bild 1.5

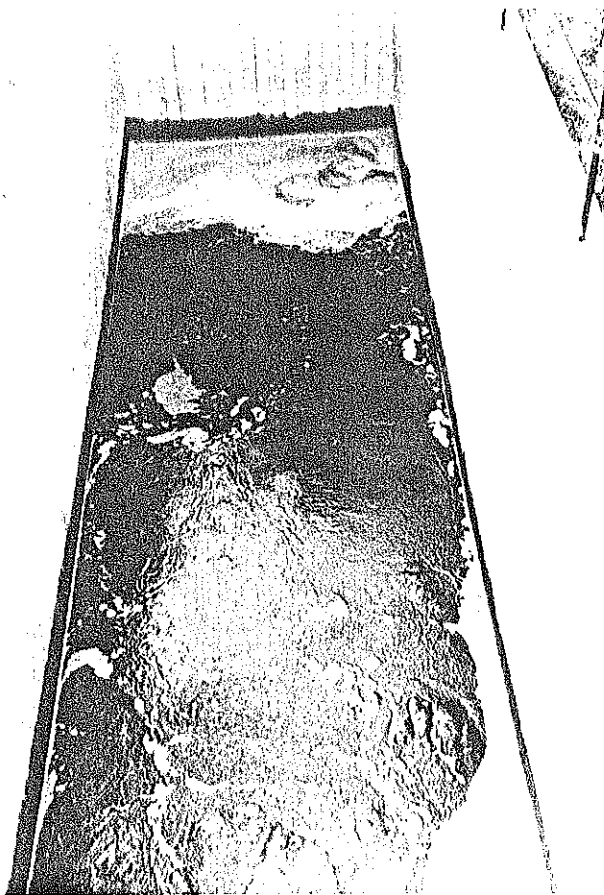


Bild 1.6

2. MODELLFÖRSÖK

2.1 Allmänt

Med resultaten av fältförsöket vid Studsvik som bakgrund konstruerades en modell av en avluftningsbrunn. Modellens konstruktion skiljer sig dock i väsentlig grad från den avluftningsanordning vilken byggts i Studsvik. Vid Studsvik har man varit tvungen att utforma konstruktionen med hänsyn till tillgängligt utrymme.

I vårt fall var däremot avsikten att försöka utforma en enkel standardkonstruktion för en avluftningsbrunn. För att uppnå detta mål vilket även är förbundet med en ekonomisk optimering utgick vi från att använda standardbrunnsringar. Brunnens utformning blev följaktligen cirkulär och dess diameter bestämdes till den största diameter för vilka brunnsringar tillverkas. Denna befanns vara $\phi 3000$.

Modellen tillverkades i plexiglas. Avluftningsbrunnen hade en diameter av 300 mm. Ingående och utgående rör hade invändiga diametern 96 mm. Brunnsdiametern kunde även varieras genom insättning av galvaniserade plåtrör till diametrarna 200 och 150 mm. En mellanvägg kunde sättas i brunnen vinkelrät mot flödet. Variation av skivans höjdläge medförde att man kunde uppnå maximal luftavgång ur brunnen. Väggens höjd var ungefär tre gånger inkommande rörs diameter. In- och utgående rör placerades på samma höjd. På så sätt uppnåddes den mest ogynnsamma avluftningen. Dvs vattenluftblandningar strömmar lättast genom brunnen då ingen nivåskillnad finns mellan in- och utgående ledning. Modellen placerades horisontellt, ty ingen möjlighet fanns att ändra ledningslutningarna utan att även brunnen var tvungen att lutas.

Enligt ovan angivna mått gavs modellen en storlek som motsvarar en skala av ca 1:10 jämfört med ledningssystemet i Studsvik.

2.2 Modellens utförande

Modellen utfördes av plexiglasrör, detta för att fotografering och visuella iakttagelser skulle kunna göras av vatten-luftflödet. Modellens utseende framgår av bild 2.1 och 2.2.

1. Rotameter (bild 2.2)
2. Luftflödes-mätare, ingående luft (bild 2.1)
3. Avluftsbrunn (bild 2.1 och 2.2)
4. Luftuppsamlare (bild 2.2)
5. Luftflödesmätare, utgående luft (bild 2.1)
6. Thomsonöverfall (bild 2.2)

Beskrivning av modellens komponenter:

1. Rotameter

Vattenflödet mättes med en rotameter. Avläsning på mm-graderad mät-skala på rotametern samt kalibrering med diagram gav aktuellt vatten-flöde.

2. Luftflödesmätare, luftmunstycke

Luften inblandades i vattnet genom ett horisontellt munstycke. För mätning av inblandad luftmängd användes en luftflödesmätare fabrikat Brooks 1355 V, storlek 6" R-6-15-B kopplad över en lufttrycksmätare vilken var ansluten till tryckluftsledningen. Med samtida värden från flödesmätaren och tryck-mätaren kunde aktuellt inkommande luftflöde beräknas. Vid samtliga mät-ningar användes en Carboloy-kula som svävkropp i luftflödesmätaren.

Luft inblandat i vatten som strömmar i rör stiger upp till rörets hjässa. Detta kan sägas vara detsamma som om vattensprånget ligger långt ifrån avluftsbrunnen. Avluftningen av rörledningen bereder i sådana fall inga större problem. Luften transporteras i rörets hjässa och stiger direkt upp till ytan i avluftsbrunnen. För att simulera det ogynnsammare fallet då vattensprånget ligger nära avluftsbrunnen tillverkades en luftförde-lare. Luftfördelaren utgjordes av en elliptisk skiva försedd med ett antal hål, 8 mm. Denna inplacerades lutande i röret. Skivans lutning och dess elliptiska form medförde att den hölls i läge.

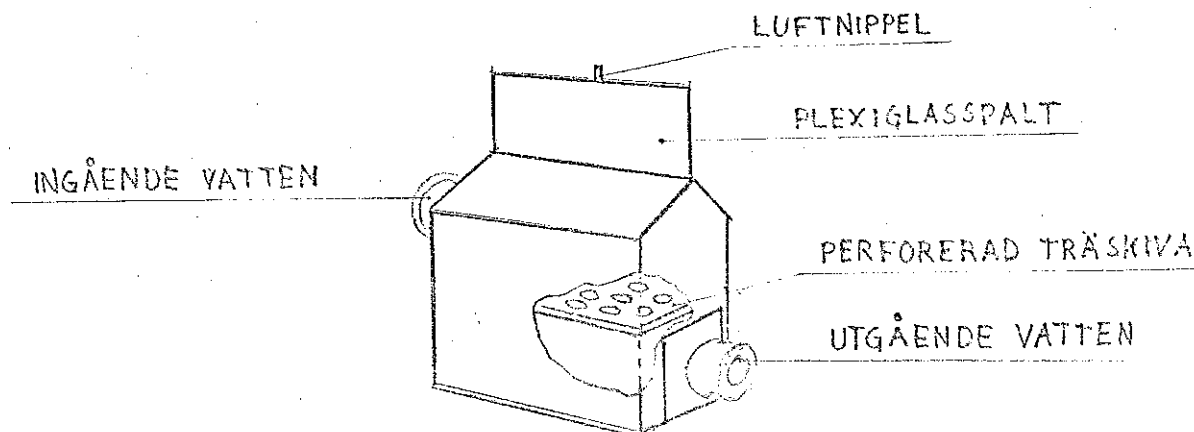
3. Avluftningsbrunn

Avluftningsbrunnen utgjordes av ett vertikalt placerat plexiglasrör med en diameter av 300 mm. I brunnen fanns två spår där en träskiva placerades vid olika mätförsök, denna var förskjutbar i höjdlöd och dess placering var vinkelrät vattenflödet. Variation av brunnsdiametern möjliggjordes med hjälp av två galvaniserade plåtrör med diametrarna 200 och 150 mm, vilka inpassades i det ursprungliga plexiglasröret med därför avsedda röranslutningar. Avståndet från brunnsbotten till rörmynningarna hos in- och utgående ledningar varierades med en cirkulär träskiva vilken var höj- och sänkbar.

4. Luftuppsamlare

Avsikten var att utgående luftflöde skulle mätas vid en behållare innan Thomsonöverfallet. En lufttät övertäckning hade konstruerats för detta ändamål. I övertäckningen hade hål upptagits för användning av pitotrör vid luftflödesmätningen. Det visade sig dock att det uppstod problem vid mätningarna genom användandet av denna konstruktion, beroende på:

- Luft samlades i hjässan på de långa slangar som förband modellen med Thomsonöverfallet
- Den volym där luften skulle ackumuleras var för stor i förhållande till luftavgången. Detta medförde att variationer i luftflödet inte kunde uppmätas.
- Luftflödet var inte tillräckligt för att pitotrörsmätning skulle kunna användas. För att komma ifrån dessa olägenheter konstruerades en luftuppsamlare.



Principen för luftuppsamlaren:

Vattnet kommer in på en högre nivå än det passerar ut. För att vattnet skall komma från inloppet till utloppet måste det passera en tråskiva med ett antal hål ($\phi 20$). Luften skiljs från vattnet och stiger upp till vattenytan inuti luftuppsamlaren. Den ur vattnet avgivna luften uppsamlas i en smal plexiglasspalt, vilken står i förbindelse med en luftflödesmätare.

5. Luftflödesmätare

Luftflödesmätaren utgöres av ett rör med en svävkropp, svävkroppens läge mäts på en skala vilken är direkt kalibrerad mot luftflödet. Luftflödet pulserade, vilket medförde avläsningssvårigheter. Pulsationerna dämpades kraftigt genom att slangarna ströps med slangklämmor.

Två olika flödesmätare användes. De skiljer sig genom tyngden på svävkroppen.

6. Thomsonöverfallet

Då mätning av utgående luftflöde befanns vara olämpligt vid vattenbehållaren (se pkt 4), användes denna i huvudsak till att reglera vattenståndet i brunnen. Denna reglering skedde genom att vattenflödet ströps med en strypfläns vid ingående ledning till behållaren. Kalibreringskurva upprättades också mellan rotametern och Thomsonöverfallet.

2.3 Luftbubblor stighastighet i vatten

För att ge en teoretisk bakgrund, vilken krävs för tolkningen av resultaten från modellförsöken, ges nedan en sammanfattning av litteraturstudier vi företagit. Dessa studier har främst behandlat luftblåsors stighastighet i vatten.

Den litteratur vi hämtat nedanstående teori ur är [3] "Strömningshastigheter kring luftbubbelridå i täthetshomogent och stillastående vatten", Anders Sjöberg, Inst.för vattenbyggnad, Meddelande nr 39, 1967 samt [4] "An experiment study of bubbles moving in liquids", Haberman, W.L. och Morton, R.K., Proceedings of the ASCE, vol 80 1954, No 379-427.

Enligt Sjöberg [3] gäller för en gasbubbla som stiger i en vätska med sin gränshastighet, dvs med konstant hastighet, kraftekvationen:

$$\text{Displacementkraft} - \text{motståndskraft} - \text{tyngd} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

Denna ekvation kan enligt Haberman-Morton [4] skrivas på formen

$$f(u, l, g, \rho, \rho_g, \mu, \mu_g, \sigma) = 0 \quad \dots\dots (2)$$

u är bubblans stighastighet

l är en för bubblan karakteristisk längd

g jordaccelerationen

ρ och ρ_g vätskan resp gasens täthet

μ och μ_g " " " " dynamiska viskositet

σ ytspänningen

Som karakteristisk längd användes ekvivalenta sfäriska radien, r_e , beräknad ur

$$\frac{4\pi}{3} r_e^3 = V \quad (\text{där } V \text{ är luftbubblans volym})$$

I ekv. (1) definieras motståndskraften som $C_d \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \sigma \cdot r_e^2$, där

C_d är motståndskoefficienten

$$C_d = \frac{8}{3} \frac{r_e \cdot g}{u^2} \quad \text{då gasens täthet är försumbar}$$

jämfört med vätskans.

Enligt Stoke gäller för enkel kropp om rörelsen är laminär och tröghets-termerna i Navier-Stokes rörelseekvationer kan försummas, samt relativa hastigheten är noll på sfärens yta att

$$C_d = \frac{24}{R_e} \quad (R_e < 1)$$

Enligt Oseen, se t ex [3] om hänsyn tas till vissa tröghetstermer

$$C_d = \frac{24}{R_e} \left(1 + \frac{3}{16} R_e\right) \quad \text{gäller för stel sfär om } (R_e < 2)$$

Motståndskoefficienten för en gasbubbla som stiger i vatten enligt Hadamard och Rybezynski, se [3].

$$C_d = \frac{16}{R_e}$$

Gasens täthet och dynamiska viskositet har försummats med hänsyn till vattnets täthet och dynamiska viskositet. Figur 2.1 visar motståndskoefficienten C_d för luftbubblor i olika vätskor, experimentellt bestämda enligt Haberman och Morton. Diagrammets minimipunkt beror på att bubbelformen ändras.

Ytspänningarna är de dominerande krafterna hos små bubblor. Vid stora bubblor, som har högre stighastighet, plattas bubblorna till beroende på att de viskösa och hydrodynamiska krafterna ökar i jämförelse med ytspänningskrafterna.

Sfäriska segment erhålles när de hydrodynamiska krafterna är helt dominerande. Motståndskoefficienten hos dessa är

$$C_d = \frac{8 g r_e}{3 u^2} = 2,6 \quad (R_e > 5000)$$

Det förekommer således tre olika typer av bubbelformer: Sfäriska, rotationselliptiska och sfäriska segment.



Haberman och Morton fann genom försök att kurvan "Rigid Sphere" i figur 2.1 bäst svarar mot de värden motståndskoefficienterna har i vatten fram till $R_e \approx 500$. Haberman och Morton undersökte också stighastigheterna hos bubblor i vattenledningsvatten, se figur 2.2.

Rörelsebanorna hos bubblor kan vara av tre typer, rätlinjig rörelse, spiralformig rörelse och zigzagrörelse. Sfäriska bubblor rör sig rätlinjigt eller i spiralform. Ellipssoida och sfäriskt segmentformade bubblor kan ha alla tre rörelsetyperna.

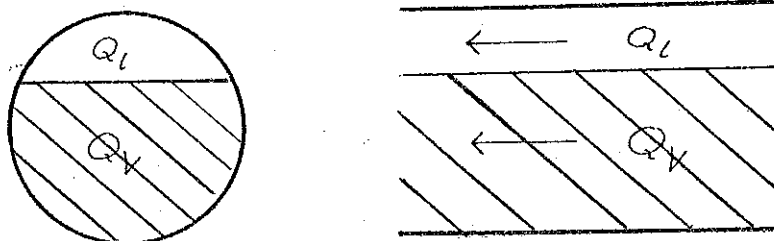
2.4 Modellförsök

2.4.1 Bestämning av luftbubblors stighastighet i strömmande vatten

De stighastigheter för luftbubblor som redovisats i fig 2.2 gäller endast för bubblor i stillastående vatten.

I vårt fall var avsikten med modellförsöket bl a att undersöka hur nära avluftningsbrunnen ett vattensprång skulle tillåtas ligga. Läget av vattensprånget är av betydelse då det gäller att få luften såsom ett hjässflöde i röret innan luften når avluftningsbrunnen. Detta beroende på att ett flöde av denna typ är lättare att avleda ur ledningen än ett välfördelat luft-vattenflöde. Genom att fotografera röret vid olika vatten- och luftflöden kan man med fotografiernas hjälp uppmäta den horisontella transportlängd under vilken bubblorna stiger från rörets underkant till dess överkant. På detta sätt kan en erforderlig längd erhållas mellan vattensprånget och avluftningsbrunnen relaterad till aktuellt vatten-luftflöde (Se bild 2.11). Då vattenhastigheten, omräknad med hänsyn till luftvolymen i röret och horisontell transportlängd, är känd kan man få fram den vertikala stighastigheten. Med hjälp av denna fås sedan bubblornas storlek ur figur 2.2.

Vattenhastighet, V , med hänsyn till luftvolymen i röret.



$$Q_{\text{tot}} = \text{vattenflöde} + \text{luftflöde} = Q_v + Q_l$$

$$A_{\text{tot}} = \text{rörets tvärsnittsarea} = \pi \cdot 0,048^2 = 0,00723 \text{ m}^2$$

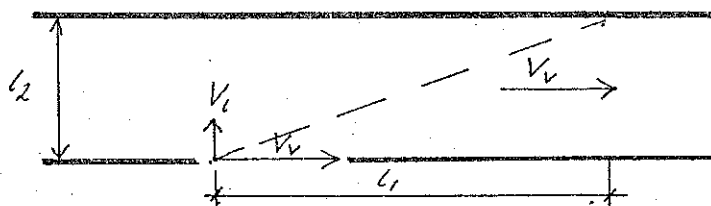
Antag att $V_{\text{luft}} = V_{\text{vatten}} = V$

$$\text{Luftens del av tvärsnittsarean } A_l = \frac{Q_l}{V}$$

$$\text{Vattnets del av tvärsnittsarean } A_v = \frac{Q_v}{V}$$

$$V = V_{\text{nom}} \left(\frac{Q_l}{Q_v} + 1 \right) = \frac{\text{vattenflöde}}{\text{rörets tvärsnittsarea}} \left(\frac{Q_l}{Q_v} + 1 \right)$$

Då V_v är känd fås genom vektorbetraktelse lufthastigheten V_1



$$l_1 = V_v \cdot t \quad \dots\dots (1)$$

$$l_2 = \text{diametern} = 97 \text{ mm} = V_1 \cdot t \quad \dots\dots (2)$$

vilket ger

$$V_1 = V_v \cdot \frac{l_2}{l_1} \quad \dots\dots (3)$$

I nedanstående tabell visas resultatet av gjorda modellförsök i syfte att mäta bubblornas stighastighet och storlek vid olika vatten-luftflöden.

Försök	Q_v Vattenfl. (l/s)	Q_l Luftflöde (l/s)	V_v Vattenh. (m/s)	l_1 (1) Hor. stig. (m)	V_1 Lufthast. (m/s)	r_e (2) Bubbelst. (cm)
1	4,00	0,151	0,574	0,446	0,124	0,05
2	4,75	0,151	0,678	0,455	0,143	0,06
3	6,00	0,144	0,850	0,519	0,157	0,07
4	3,35	0,205	0,492	0,355	0,133	0,05
5	4,60	0,300	0,678	0,500	0,130	0,05
6	5,60	0,457	0,838	0,533	0,151	0,07
7	6,40	1,074	1,034	0,576	0,172	0,08
8	6,40	1,746	1,127	0,750	0,144	0,06

(1) l_1 uppmätt på fotografier

(2) r_e hämtade ur diagram i [3]

En jämförelse mellan de i tabell ovan erhållna bubbelradierna med de resultat vilka erhållits i ett försök utfört i [3], där man undersökt stighastigheter och bubbelradier i stillastående vatten, uppvisar vissa skillnader.

I [3] har man undersökt punktutsläpp av luft i vertikala munstycken, figur 2.3 redovisar bubbelstorleken i % av totala volymen.

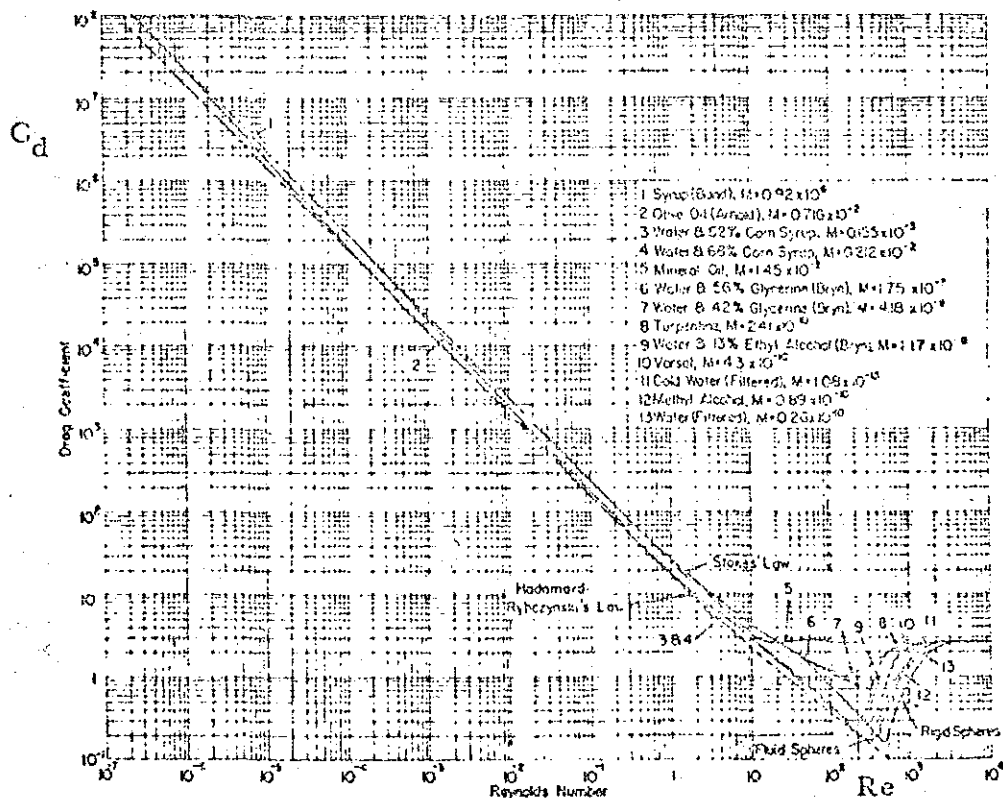


Fig 2.1 Motståndskoefficienten C_d som funktion av Reynolds tal Re för luftbubblor som stiger med sin gränshastighet i olika vätskor. Efter Haberman och Morton [4]

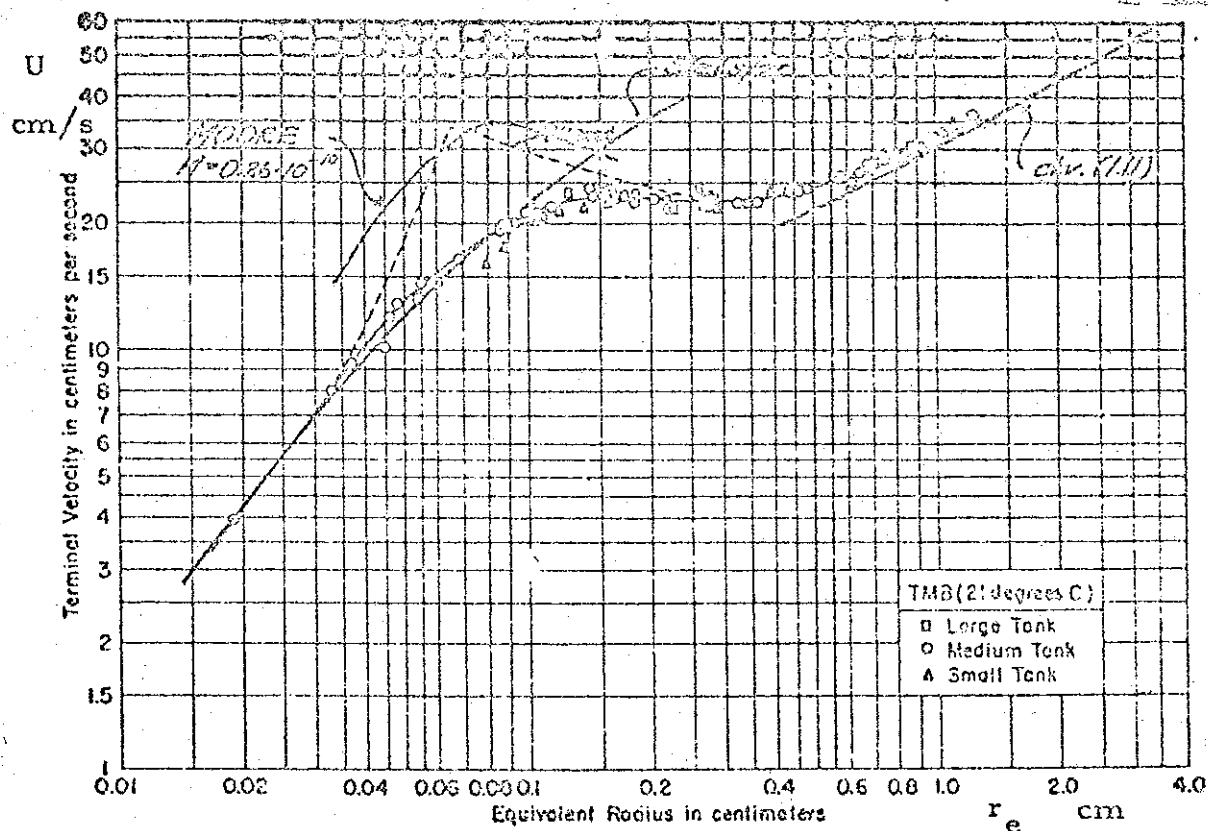


Fig 2.2 Gränshastigheten U för luftbubblor i vattenledningsvatten som funktion av bubblornas ekvivalenta sfäriska radie r_e . Efter Haberman och Morton [4]

Volymandel i %

Fig 2.3 Bubblornas volymfördelning som funktion av ekvivalenta radien r_e för punktutsläpp. Munstycksradien $r_o = 0,04$ cm.

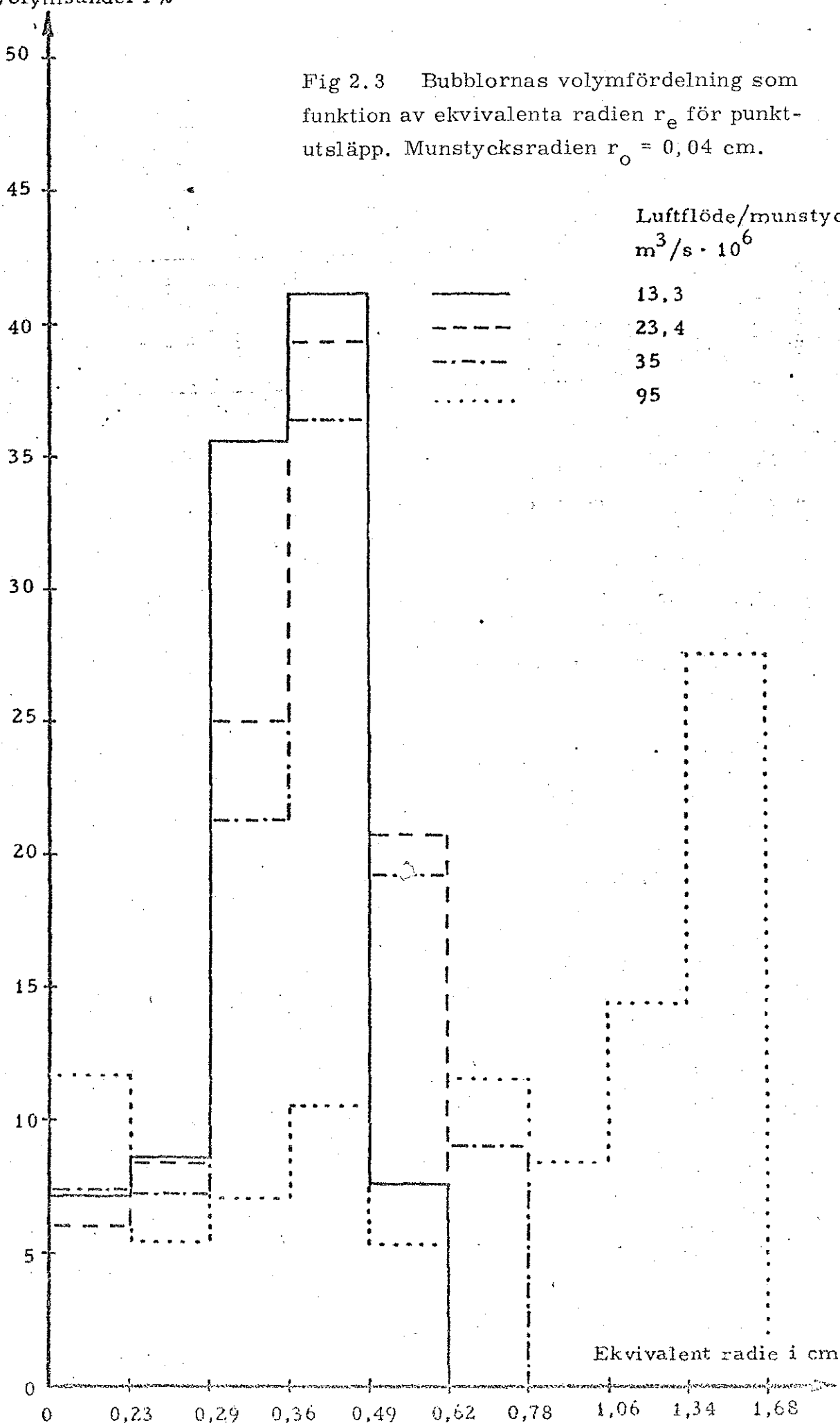
Luftflöde/munstycke
 $\text{m}^3/\text{s} \cdot 10^6$

13,3

23,4

35

95



Ekvivalent radie i cm

Ur diagrammet framgår att ungefär 12 % volymsandel utgöres av bubblor med en radie som är mindre än 0,23 cm. Detta gäller vid ett luftflöde som är 0,095 l/s och om munstycksradien är 0,04 cm.

I vårt fall är munstycket horisontellt och med en radie som är 0,2 cm. Luftflödet är lägst 0,151 l/s och vattnet är inte stillastående. En direkt jämförelse mellan [3] och våra försök är inte korrekt men har gjorts i syfte att se om bubbelstorleken och stighastigheter verkar rimliga.

Vi har genomgående fått lägre värden på stighastigheten, vilket torde bero på vattnets turbulens. De värden som räknats fram på bubbelradierna i tabellen ovan kan således vara större och skall ej tolkas som absoluta. Troli- gen varierar bubblornas storlek mellan en diameter på 1-5 mm. Denna högsta gräns har bestämts genom visuella iakttagelser. I diagram 2.1, 2.2, 2.3 nedan har en grafisk representation gjorts.

Diagram 2.1 visar stighastigheten hos bubblorna, v_1 , som funktion av förhållandet mellan luftflödet och vattenflödet. Diagram 2.2 a visar stighastigheten, v_1 , som funktion av vattenflödet.

Diagram 2.2 b visar stighastigheten, v_1 , som funktion av luftflödet.

Vid en jämförelse mellan diagram 2.1 och 2.2 a och 2.2 b kan man finna tendenser till att den vertikala stighastigheten (v_1) ökar med vattenflödet.

Vid praktisk dimensionering av en avluftningsbrunn vill man ha ett hjässflöde. Man bör då studera den horisontella transportlängden. Den horisontella transportlängden kan beräknas med hjälp av formel (3), om man känner vattenflödet, luftflödet samt rördiameter på inkommande ledning.

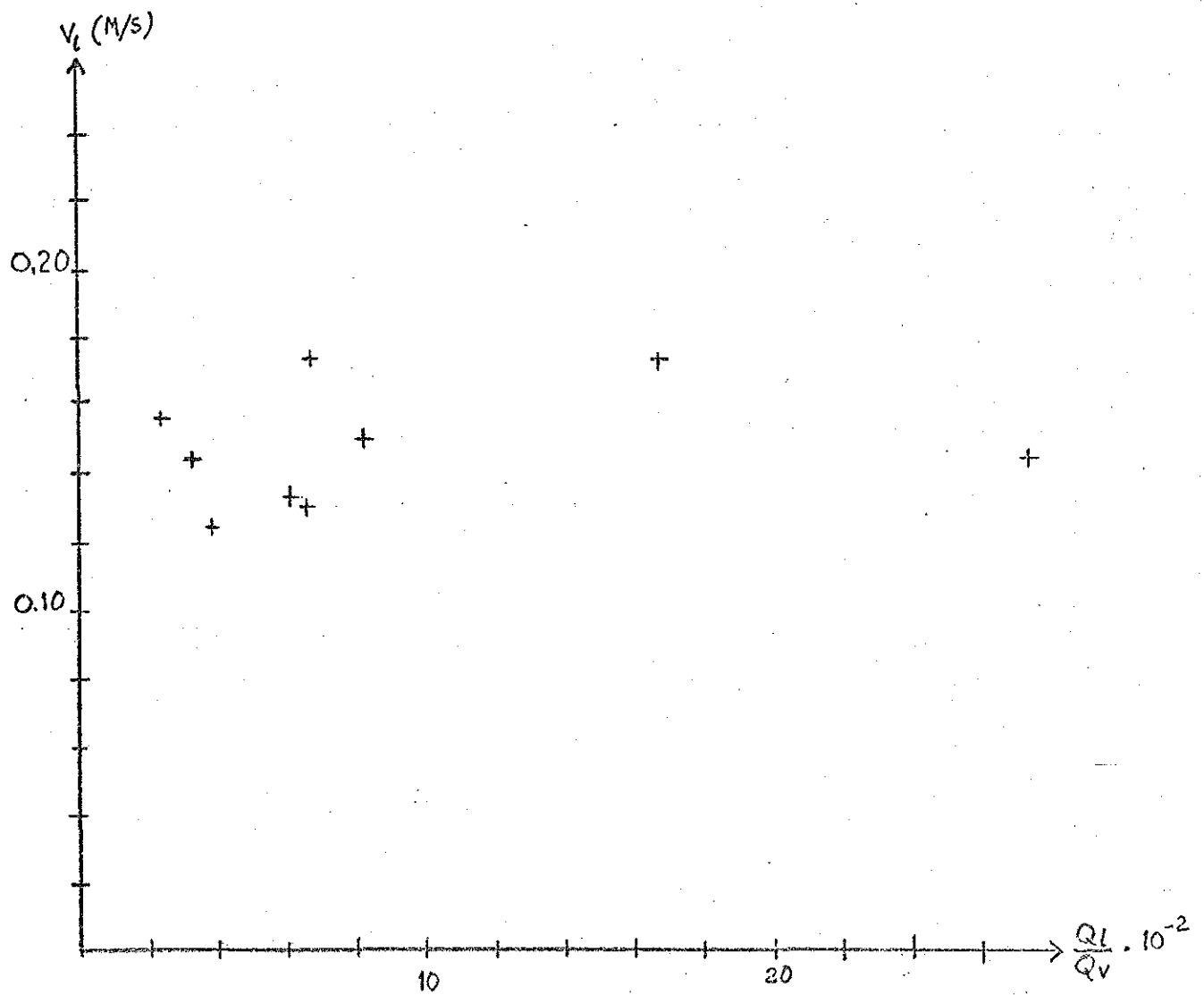


Diagram 2:1 Stighastigheten hos bubblorna $V_l = f\left(\frac{Q_l}{Q_v}\right)$
 som funktion av förhållandet
 luftflöde
 vattenflöde

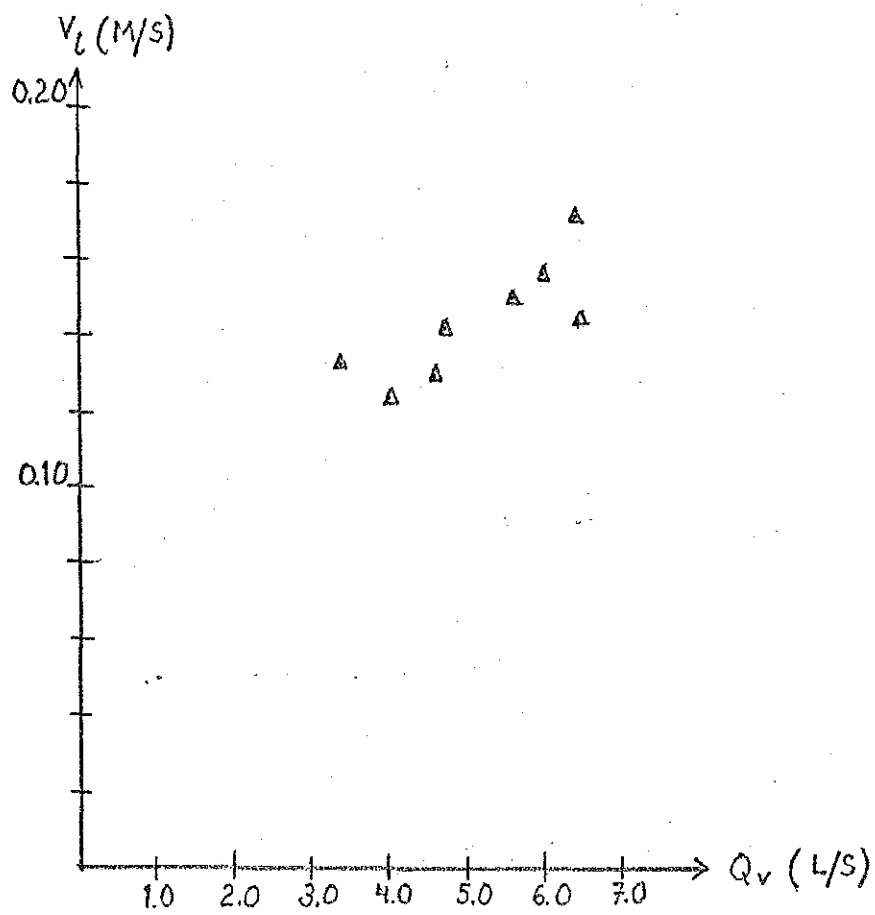


Diagram 2:2A

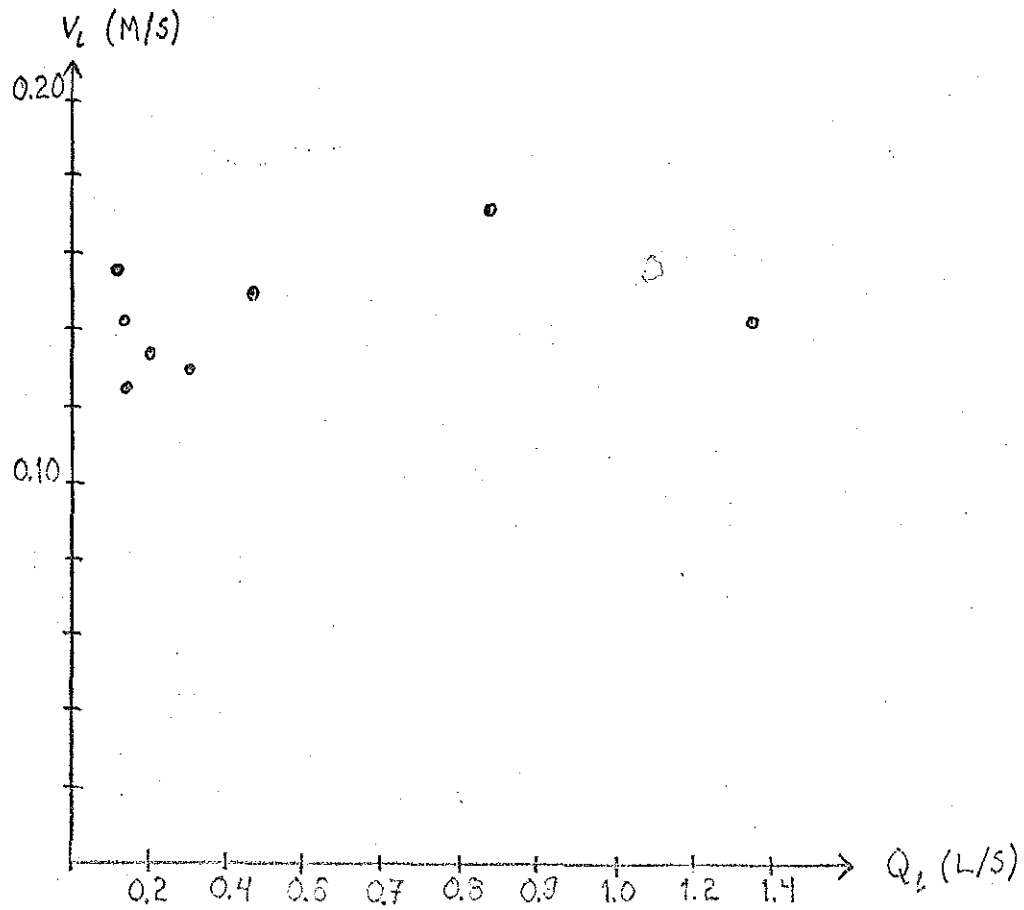


Diagram 2:2B

2.4.2 a Avluftningskapacitetens beroende av mellanväggens placering

Genom att visuellt betrakta luftbubblornas väg genom brunnen då mellanväggen placerades i olika vinklar i förhållande till inkommande vattenluftflöde, befanns lämpligaste placering av mellanväggen vara vinkelrät mot detta flöde.

För att bestämma lämpligaste läge av mellanväggen i vertikalled gjordes följande försök. Vatten- och luftflödet hölls konstant medan mellanväggen flyttades i olika höjdlägen i förhållande till brunnens botten (Se bild 2.3 - 2.9). I diagram 2.3 redovisas resultatet av detta försök. Vattenflödet var 5,1 l/s och luftflödet 1,92 l/s.

Avluftningskapaciteten når i detta försök sitt max. värde då avståndet från underkantsskiva till brunnens botten är ungefär 10 cm. Troligen varierar detta avstånd beroende på vattenflödet. Då endast ett försök har utförts är det vanskligt att försöka hitta något absolut förhållande mellan avstånd och vattenflöde.

Det har dock genom visuella betraktelser vid olika placering av mellanväggen, se bild 2.3 - 2.9, kunnat klarläggas vissa betydelsefulla faktorer vilka inverkar på avluftningskapaciteten.

Bild 2.3. Avståndet mellan underkantsskiva och brunnens botten är 28 cm. Detta avstånd är för stort, luften passerar under skivan.

Bild 2.4 - 2.5. Luften passerar under skivan.

Bild 2.6. Vattnet börjar rinna över skivan, luft passerar fortfarande under.

Bild 2.7. Vattnet rinner över och under skivan. Nästan all luft passerar över skivan. Detta är den mest fördelaktiga placeringen.

Bild 2.8. Avståndet mellan skivan och botten är för litet, allt mer vatten måste passera över skivan. Vattnet river då med sig luften över skivan.

Bild 2.9. Både vatten och luft måste passera över skivan, vattnet river även här med sig luft när det passerar skivan.

Bild 2.10. Vattnets passage genom brunnen utan skiva.

Vid konstruktion av avluftningsbrunn med mellanvägg har således skivans placering i vertikalled en avsevärd betydelse för avluftningskapaciteten. Man bör tillse att avståndet mellan skivans underkant och brunnens botten är vare sig för stort eller för litet (Se diagram 2.3).

Försöken visade även att vattnet skall kunna passera över skivan. Övertäckningen av skivan, som beror av dämningen nedströms brunnen, får ej vara så liten att ett vattensprång uppkommer. Detta vattensprång skulle då piska in luft i utgående rör.

I försöken har tillräcklig dämning erhållits genom en varierbar strypfläns, som finns strax innan vattenbehållaren nedströms avluftningsbrunnen.

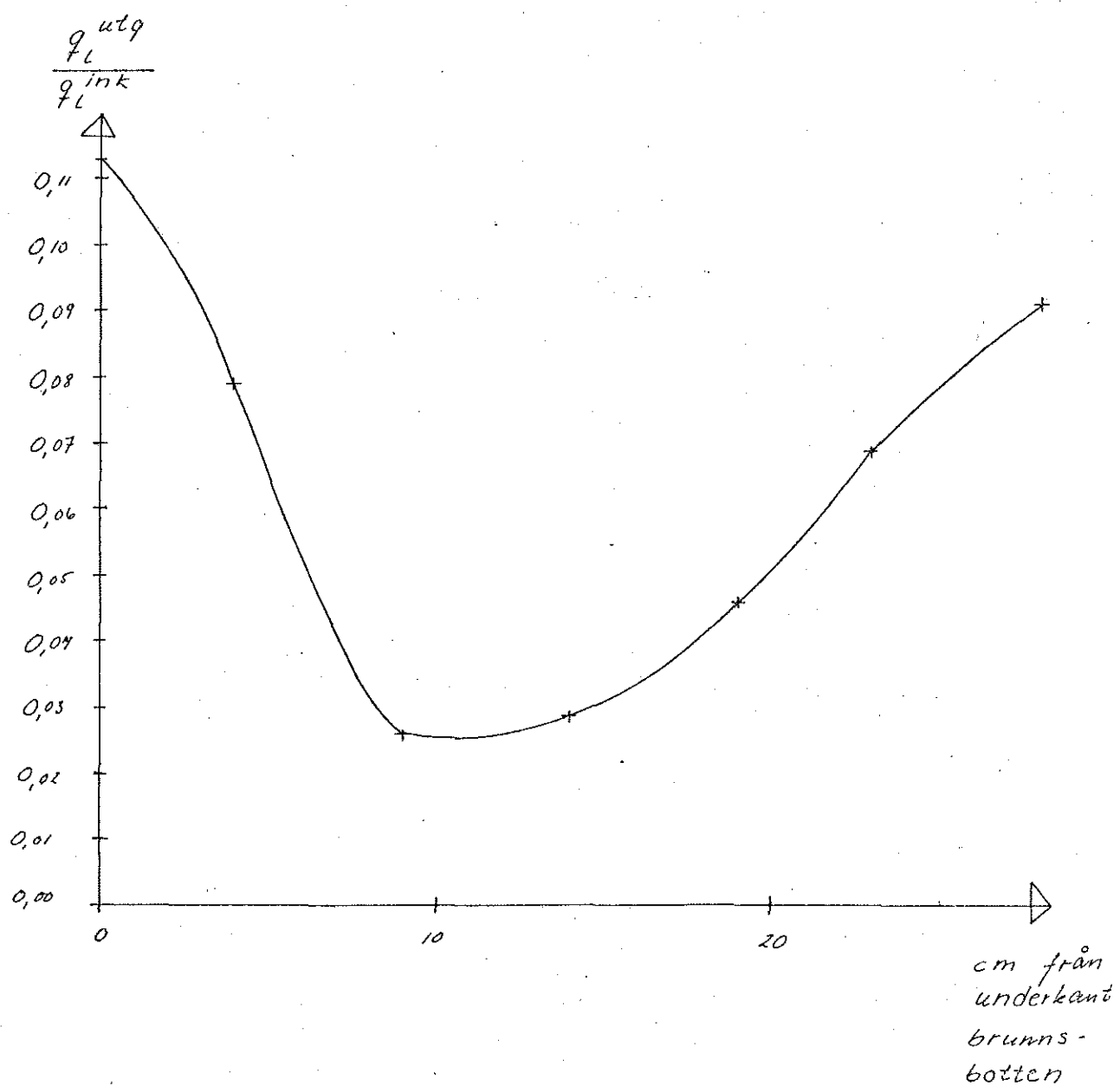


Diagram 2.3 Avluftningskapacitetens beroende av mellanväggens placering i vertikalled.

2.4.2 b Avluftningskapacitetens beroende på brunnsdiametern

Vid mätning av avluftningskapaciteten hos brunnen befanns lämpligast att mäta ingående luftmängd i röret innan brunnen samt utgående luftmängd efter brunnen och relatera dessa till aktuellt vattenflöde.

Fyra olika mätningar företogs:

Mätning 1: Brunnsdiameter 300 utan mellanvägg

Mätning 2: Brunnsdiameter 200 utan mellanvägg

Mätning 3: Brunnsdiameter 150 utan mellanvägg

Mätning 4: Brunnsdiameter 300 med mellanvägg

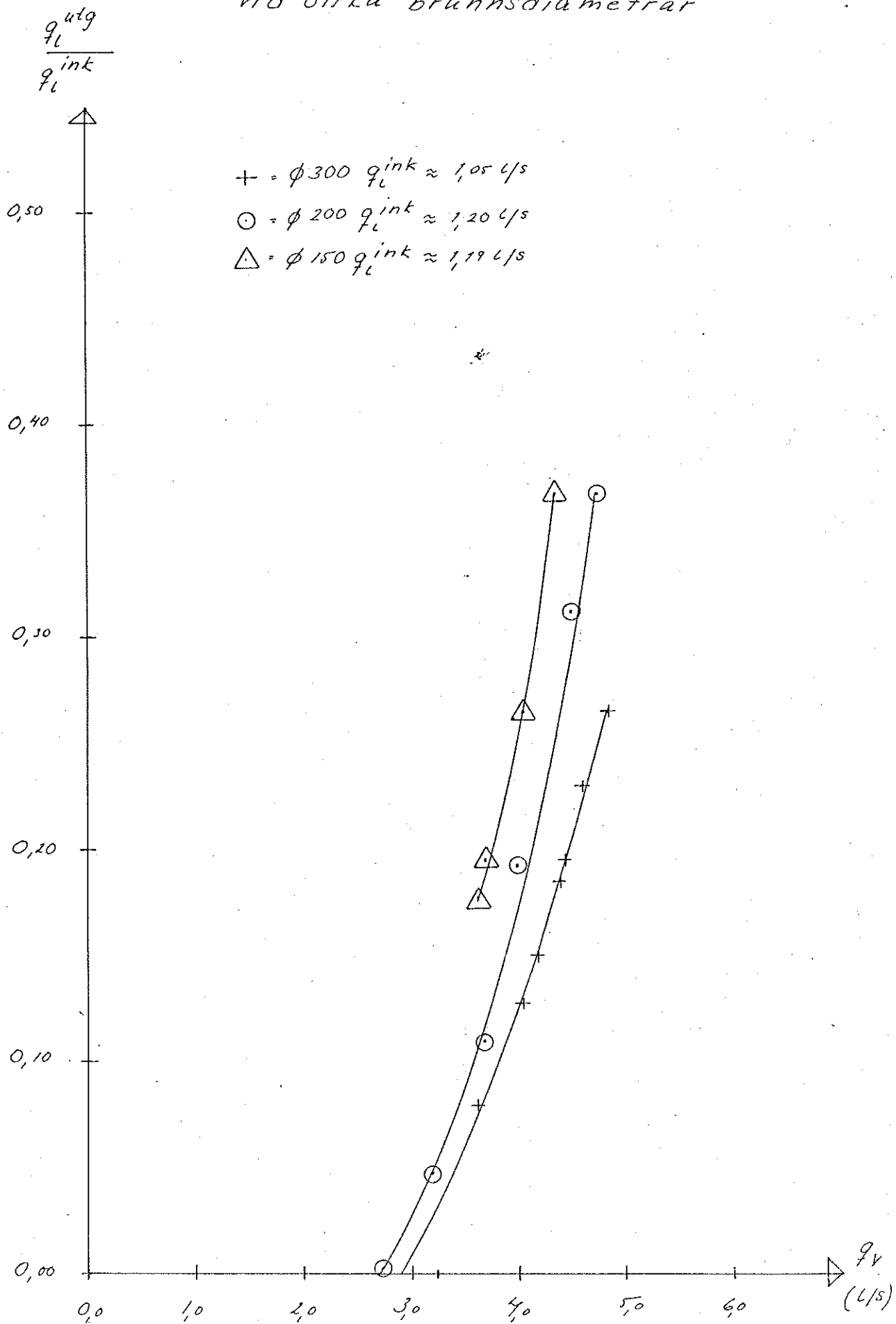
En sammanställning av brunnsdiameterarnas inverkan på avluftningskapaciteten redovisas i diagram 2.4. Diagram 2.5 visar avluftningskapaciteten utan och med mellanvägg för diametern 300 mm vid variation av luftflödet. Mellanväggen är placerad i optimalt läge, se kapitel 2.4.2 a. Ur diagram 2.4 framgår att en ökning av brunnsdiametern har en gynnsam effekt på avluftningskapaciteten.

Av de mer utförliga mätningarna, se diagram 2.5, vid ϕ 300 kan man märka att ett gränsflöde uppnås vid 3,2 l/s då luften börjar följa med i utloppsröret. Detta gränsflöde verkar vara oberoende av inkommande luftflöde. Diagram 2.5 visar också att en inplacering av mellanvägg vid de då aktuella vatten- och luftflödena reducerar luftflödet med mer än 99,7 %.

Diagram 2.4

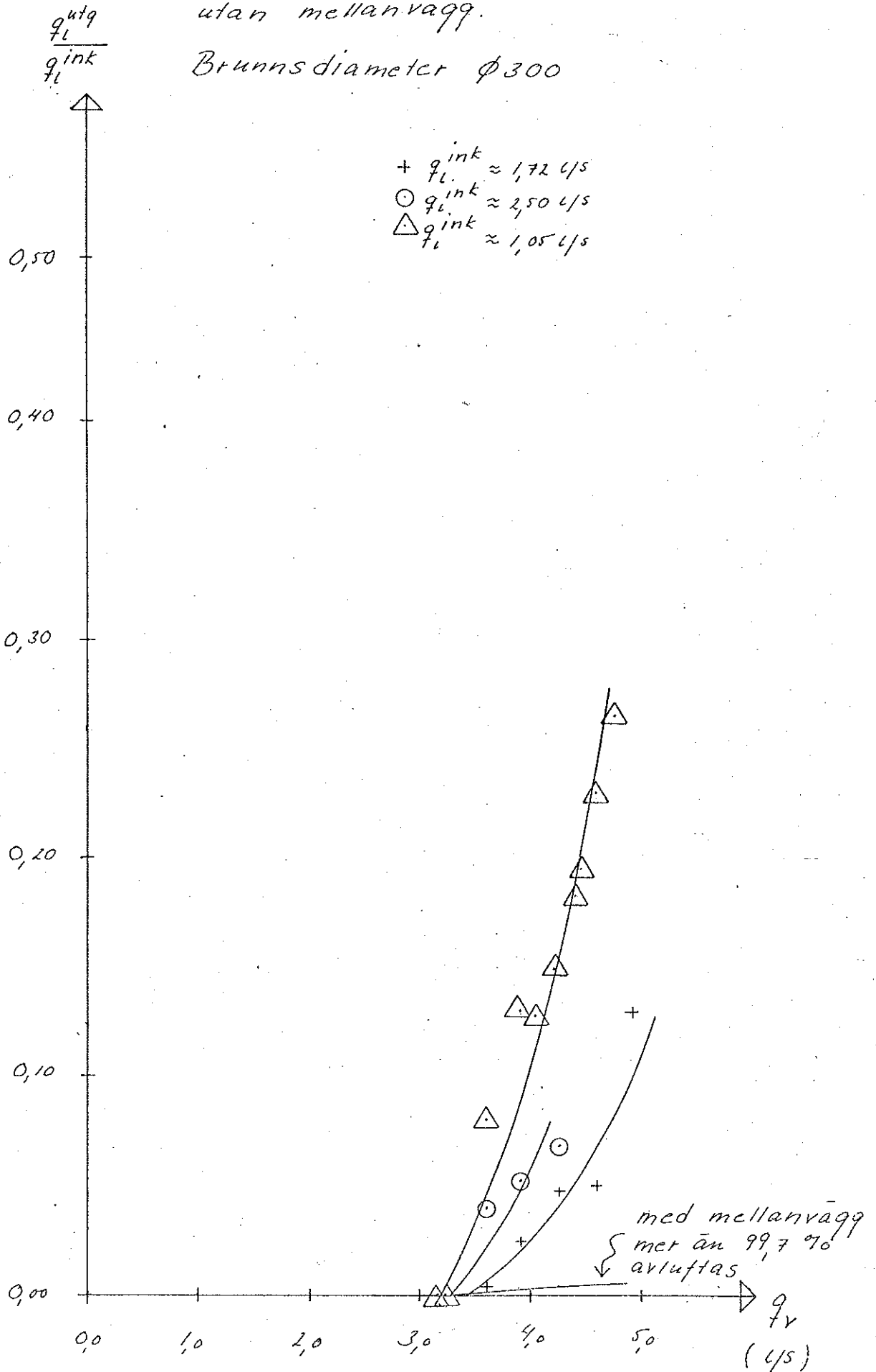
Avluftningskapacitet
som funktion av vattenflödet
vid olika brunnsdiametrar

37.



Avluftningskapacitet som
funktion av vattenflöde vid
olika luftflöden med och
utan mellanvägg.

Brunnsdiameter $\phi 300$



3. SLUTKOMMENTAR

Vid större rörledningar där vattenflödet varierar, t ex dagvattenledningar, förekommer ofta att rören inte har fylld tvärsnittsarea. En del av den luft som då finns i rörets hjässa kan inblandas i vattnet vid ett nedströms beläget vattensprång. Avluftas inte denna luft ur ledningen kan ledningen, om den t ex mynnar under vatten, flyta upp och knäckas. Dessutom kan svängningar och pulsationer uppkomma.

Genom att placera avluftsbrunnar på ledningen kan luften avlägsnas. Har man beräknat var vattensprånget ligger i ledningen och inga hinder för var avluftsbrunnen kan placeras finns, kan man ofta klara sig med en relativt enkelt utformad brunn. Vet man språngets läge bör man placera brunnen på minst det avstånd från språnget som motsvarar den transportlängd den inspiskade luften kräver för att stiga upp till rörets hjässa. Ligger luften i rörets hjässa är den lätt att avlufta. Man kan då använda en vanlig standardbrunn utan några som helst tekniska arrangemang. Kan man däremot inte placera brunnen var som helst på grund av t ex utrymmesbrist, dvs ligger vattensprånget så nära brunnen att hjässföde ej hinner utbildas bör brunnen utformas med mellanvägg. Placeringen av denna mellanvägg i vertikalled är då av stor betydelse.

Avslutningsvis kan sägas att de viktigaste parametrarna vid dimensionering av avluftsbrunnar är dess diameter och den vertikala väggens inplacering i vertikalled.

2.5 BILDBILAGA II

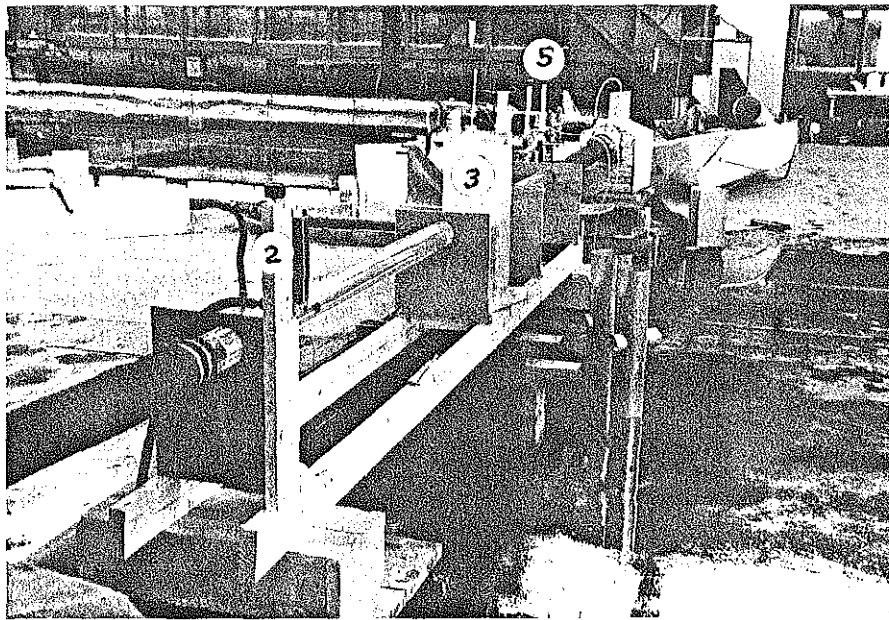


Bild 2.1

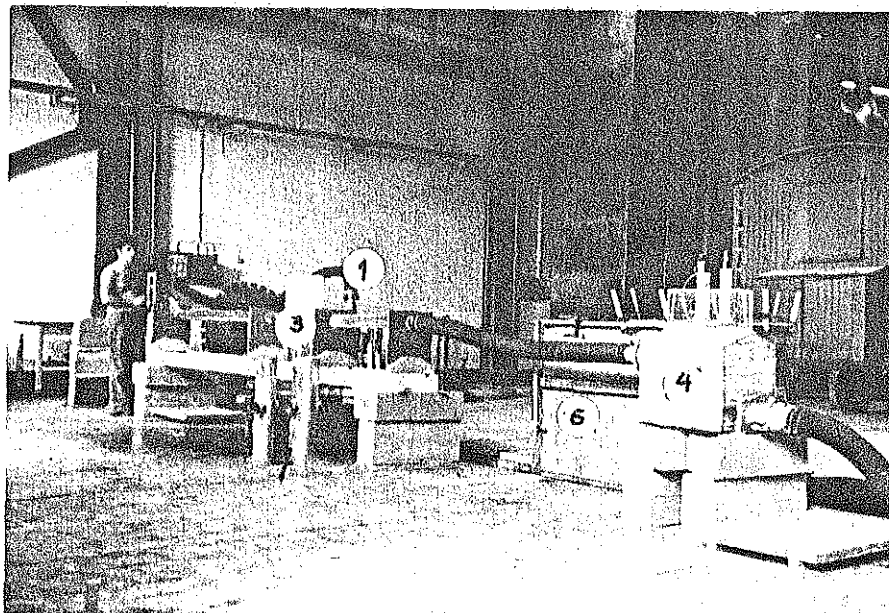


Bild 2.2

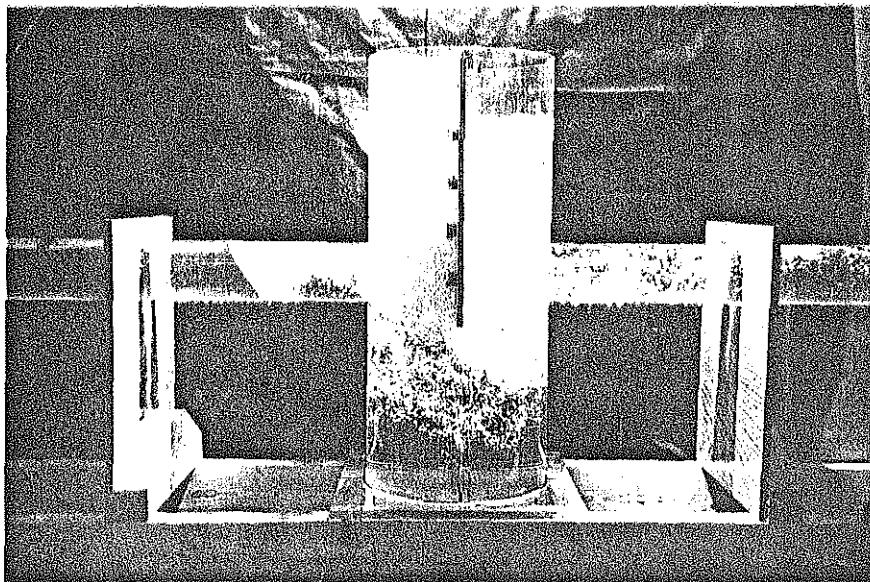


Bild 2.3

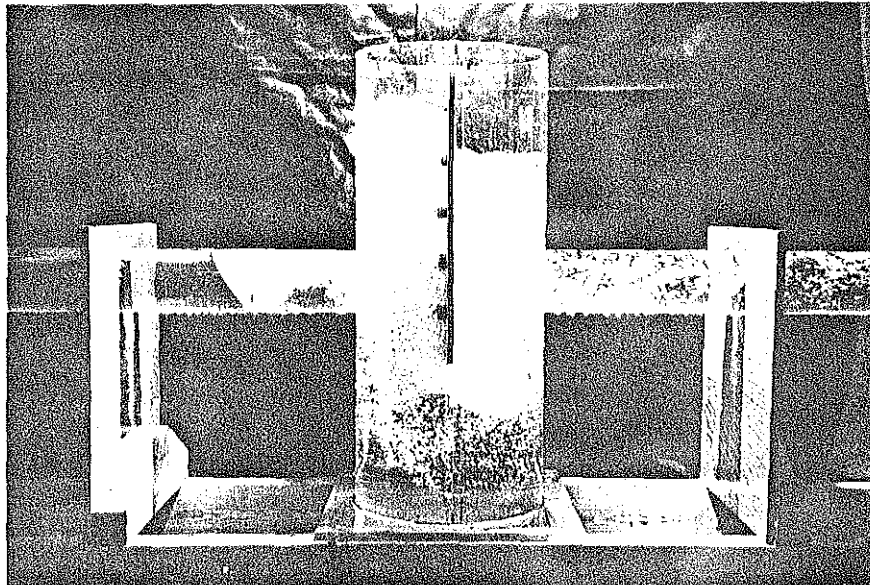


Bild 2.4

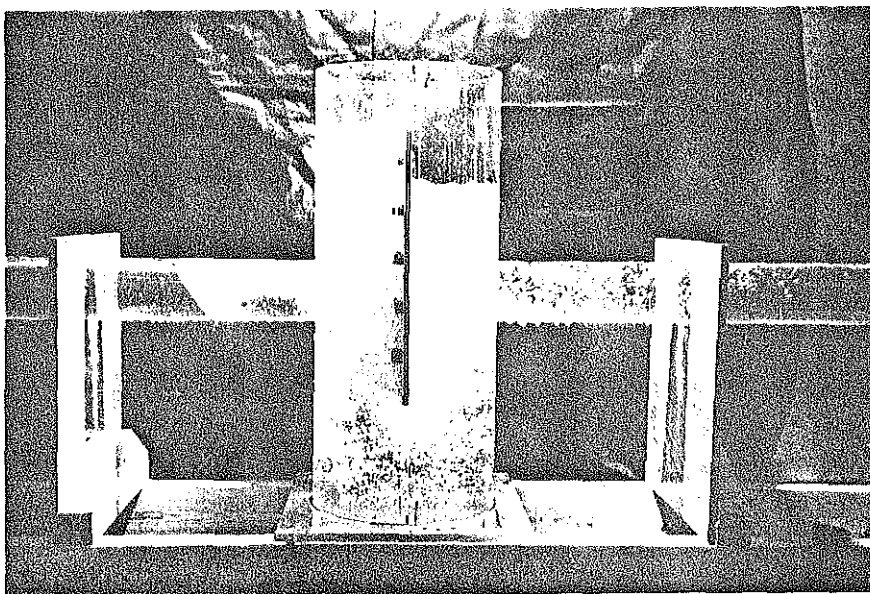


Bild 2.5

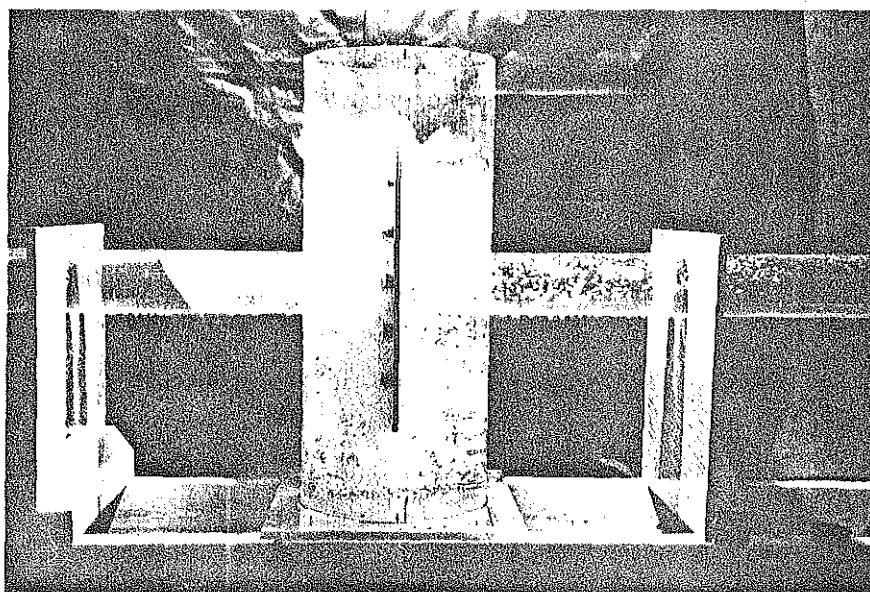


Bild 2.6

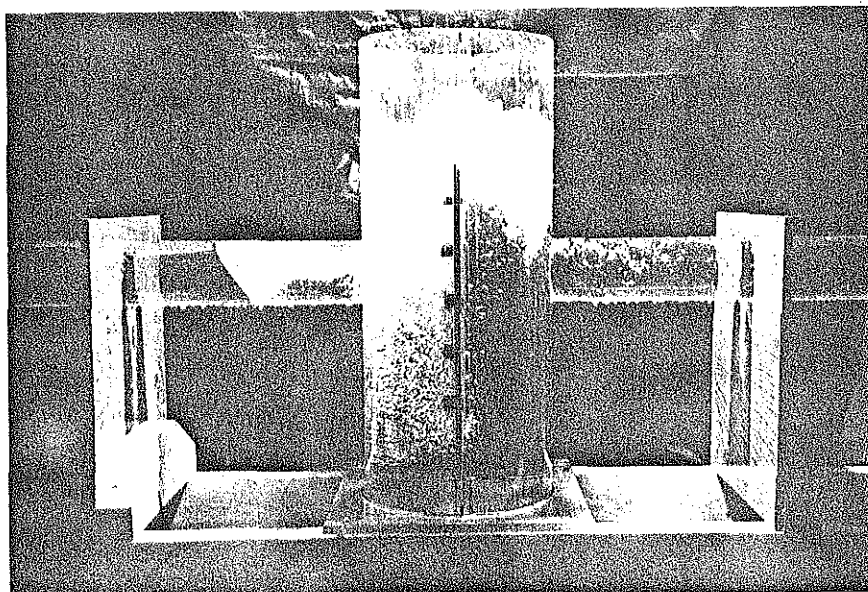


Bild 2.7

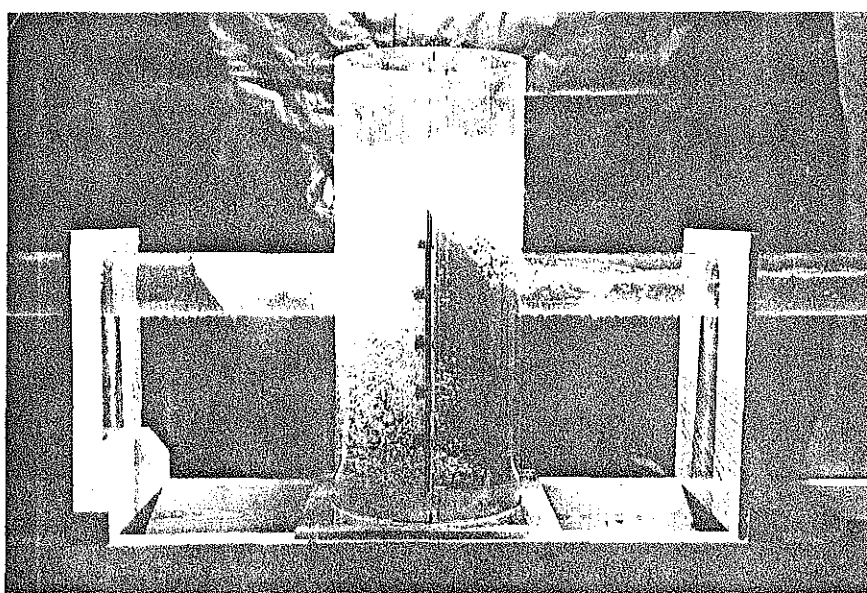


Bild 2.8

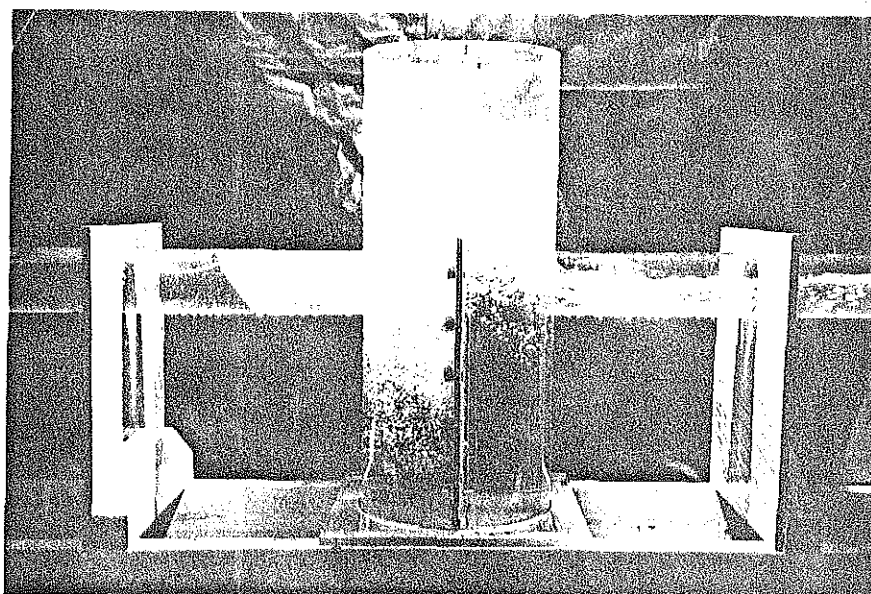


Bild 2.9

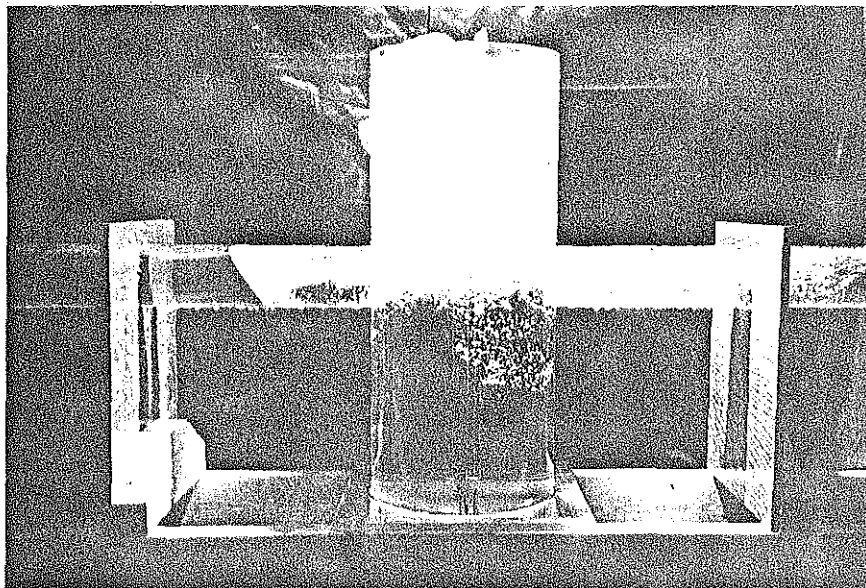


Bild 2. 10

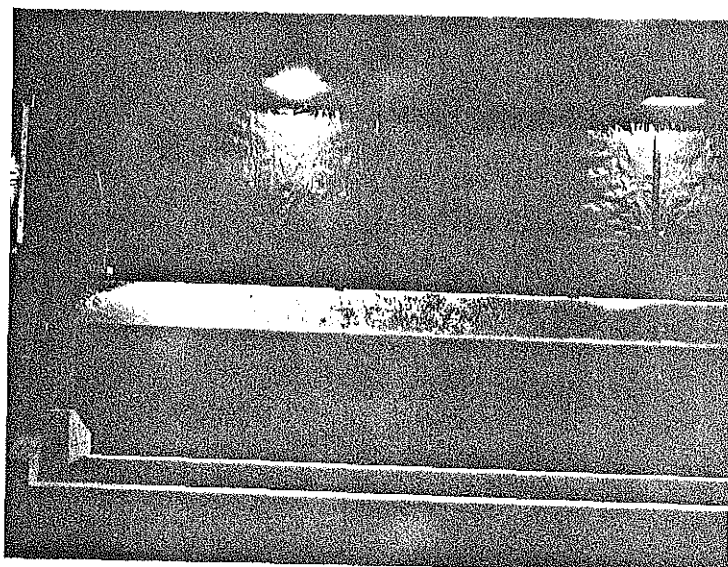


Bild 2. 11

4. LITTERATURFÖRTECKNING

- [1] A Kalinske, A.A., and Robertson, I.M., "Closed Conduit Flow, Entrainment of Air in Flowing Water, A symposium, "Proceedings, American Society of Civil Engineers 68: 1141-1153 September 1942
- B Kennison, K.R., "A Discussion of Entrainment of Air in Flowing Water, A symposium", Proceedings, American Society of Civil Engineers 69. No 2: 306-310 February 1943
- [2] Rydberg, J., "Luftblåsors rörelse i vattenfyllda rörledningar", Tidskrift för Värme-, Ventilations- och Kylteknik 1951. Nr 11 Sid 151-158
- [3] Sjöberg, A., "Strömningshastigheter kring luftbubbelridå i täthets-homogent och stillastående vatten", Inst. för vattenbyggnad, CTH Meddelande nr 39, 1967
- [4] Habermann, W.L. and Morton, R.K., "An Experimental Study of Bubble moving in Liquids", Proceedings, American Society of Civil Engineers 80, 1954 No 379-427
- Gandenbergh, W., "Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, München 1957