



Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers tekniska högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

MODELLSTUDIER

Jämförande studier av datorberäkningar
och verkligt strömningsfall

av

Johan Jansson och Håkan Karlsson

Examensarbete 1989:4

Göteborg 1989

Adress: Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 GÖTEBORG

Telefon: 031-72 10 00

FÖRORD

Detta är rapporten från vårt examensarbete på civilingenjörsutbildningen på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet har gjorts på uppdrag av, och i nära samarbete med, Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby. Det har varit ett stimulerande och givande arbete, med både praktisk och teoretisk problemlösning. Alltifrån mätningar av topografi och hastigheter vid laboratorieförsöken på Chalmers, teoristudier och datorkörningar i Älvkarleby till utvärdering och rapportskrivning.

Vi riktar ett varmt tack till alla dem som bistått oss under arbetets gång. Speciellt till vår handledare Steffen Häggström på Institutionen för Vattenbyggnad och till uppdragsgivaren Lars Hammar på Vattenfall.

Göteborg december 1989

Johan Jansson Håkan Karlsson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
1. SAMMANFATTNING	4
2. UPPGIFT	5
3. BAKGRUND	6
4. LABORATORIEFÖRSÖK	9
4.1 Bakgrund	9
4.2 Skalförhållande modell-prototyp	10
4.3 Utformning	11
4.4 Topografi	12
4.5 Vattenytans nivå	13
4.6 Strömningstillstånd	13
4.7 Mikroflygeln	14
4.8 Hastighetsmätning	16
5. DATORMODELL	19
5.1 Allmänt	19
5.2 Geometri	20
5.3 Randvillkor	22
5.4 Datorberäkningar	22
5.5 Utdata	23
5.6 Praktiska erfarenheter av PHOENICS	24
6. JÄMFÖRELSE	25
6.1 Jämförelsevärden för hastigheten	25
6.2 Hastigheter	27
6.3 Lugnvattenområden	33
6.4 Avlösningsszon vid intaget	40
6.5 Friktionsförluster	42

7. SLUTSATSER	48
7.1 Strömningsbilder	48
7.2 Friktion	49
7.3 Tredimensionella fenomen	49
7.4 Modeller-prototyp	50
7.5 Vidare studier	51
8. REFERENSER	52

BILAGOR

- Bilaga 1 Modellområdets topografi
- Bilaga 2 Indatafilen, Q1
- Bilaga 3 Cellindelning i datormodellen

1. SAMMANFATTNING

Rapporten är resultatet av ett examensarbete utfört på Institutionen för Vattenbyggnad på Chalmers Tekniska Högskola på uppdrag av Vattenfall i Älvkarleby.

Mätningar av vattenhastigheter och strömningsriktningar i en fysisk modell av området uppströms ett vattenkraftverk jämförs med datorberäkningar med programsystemet PHOENICS. Parametrarna i datormodellen varieras för att studera deras inverkan på strömningsbilden. I rapporten ingår också en uppskattning av friktionsförluster i datormodellen, samt en studie av hur en avlösningsszon i den fysiska modellen representeras i datormodellen.

Det visar sig att den tvådimensionella datormodellen väl kan beskriva strömningsförloppet i den fysiska modellen, framförallt i strömfåran en bit uppströms kraftverket. Strax uppströms intaget krävs nog en tredimensionell datormodell om man skall göra en noggrann analys av strömningsförhållandena.

I datorberäkningarna varieras de parametrar som beskriver bottenfriktion och vattnets turbulenta virvelviskositet, Φ . Av de datorkörningar som vi har gjort stämmer strömningsbilden beräknad med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen -6 bäst överens med den som mätts upp i den fysiska modellen.

2. UPPGIFT

Vattenfall har på senare år i allt större utsträckning använt datormodeller för att studera strömningsbilder i strömfåror och magasin. Man är naturligtvis beroende av att datorberäkningarna stämmer överens med verkligheten. Därför har vi fått uppgiften att studera hur väl en datormodell i PHOENICS kan beskriva ett strömningsförlopp. Det görs genom att jämföra strömningsbilder och friktionsförluster för ett strömningsförlopp i en fysisk modell med datorberäkningar för motsvarande fall.

Laboratorieförsöken görs i en fysisk modell av strömfåran i Motala ström strax uppströms Borensbergs kraftstation. Strömningsbilden i den fysiska modellen bestäms genom att vattenhastigheter och strömningsriktningar mäts i en mängd punkter på olika djup.

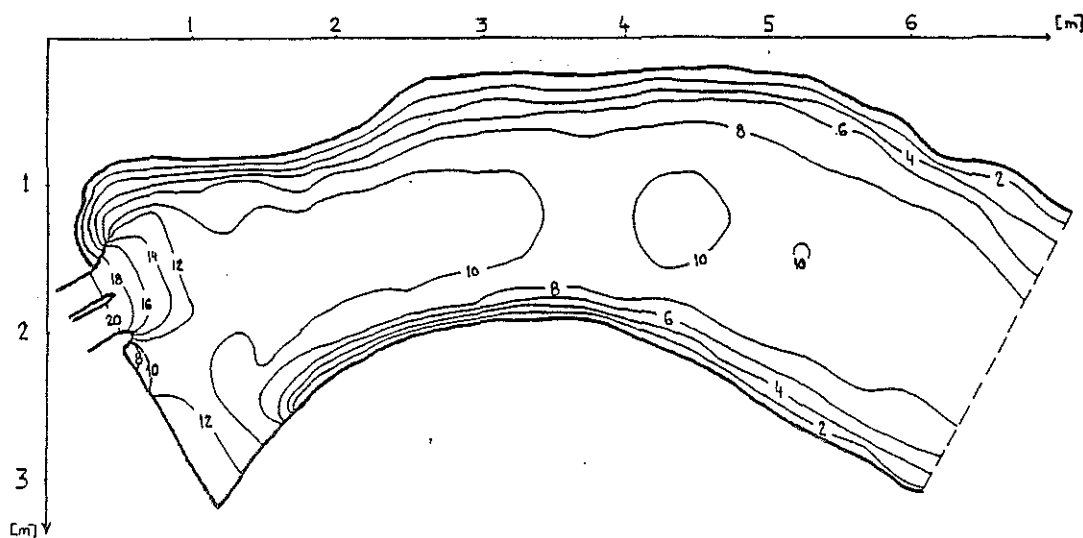
Motsvarande datormodell upprättas i programsystemet PHOENICS. De parametrar som beskriver bottenfriktion och turbulent virvelviskositet varieras för att studera deras inverkan på strömningsbild och friktionsförlust i datormodellen.

3. BAKGRUND

Vattenfall har länge byggt fysiska modeller över nästan alla planerade kraftverksutbyggnader. Det är ett tidskrävande och kostsamt arbete som görs för att finna bästa läge och utformning av utbyggnaden samt för att studera påverkan på den befintliga miljön.

Vid optimering av läge och utformning är det av intresse att studera strömningsbilden i modellen. Då skulle en teoretisk beräkningsmodell vara minst lika önskvärd. På grund av komplexiteten i de erforderliga beräkningsmetoderna, så har dock den fysiska modellen länge varit den bästa metoden att simulera strömningsbilden i en prototyp. Men med hjälp av nya beräkningsmetoder och snabbare, kraftfullare datorer har det på senare år blivit möjligt att skapa allt bättre teoretiska strömningsmodeller.

Frågan kvarstår dock hur pass väl den teoretiska modellen beskriver den verkliga strömningsbilden. Det mest intressanta vore att jämföra datormodellen med prototypen i Borensberg. Det är dock svårt att inom ramen för ett examensarbete mäta strömningsbild och topografi med tillräcklig noggrannhet där. Därför väljer vi laboratoriemätningar i en fysisk modell som jämförelsematerial.



Figur 1. Topografi i den fysiska modellen av strömfåran uppströms Borensbergs kraftstation. Nivåkurvorna avser vattendjup i centimeter vid modellförsöken.

Det finns naturligtvis mycket att säga om datormodeller och deras användbarhet i olika sammanhang. I nuläget har datormodeller och fysiska modeller delvis olika användningsområden. Bland fördelarna med att använda en datormodell kan nämnas (fritt från [1]):

- + Låg kostnad är den viktigaste fördelen. Prisskillnaden jämfört med laborieförsök blir större ju mer komplicerat strömningsfallet är och förväntas öka i framtiden när datorkostnaden minskar.

- + Tidsåtgången är i många fall mindre. Man kan dessutom enkelt ändra förutsättningarna.
- + En datormodell ger komplett och detaljerad information om de relevanta storheterna.
- + Det är möjligt att studera förhållanden som är svåra att simulera i en fysisk modell, t.ex mycket stora eller små dimensioner.

Det finns också saker som talar för att använda en fysisk modell:

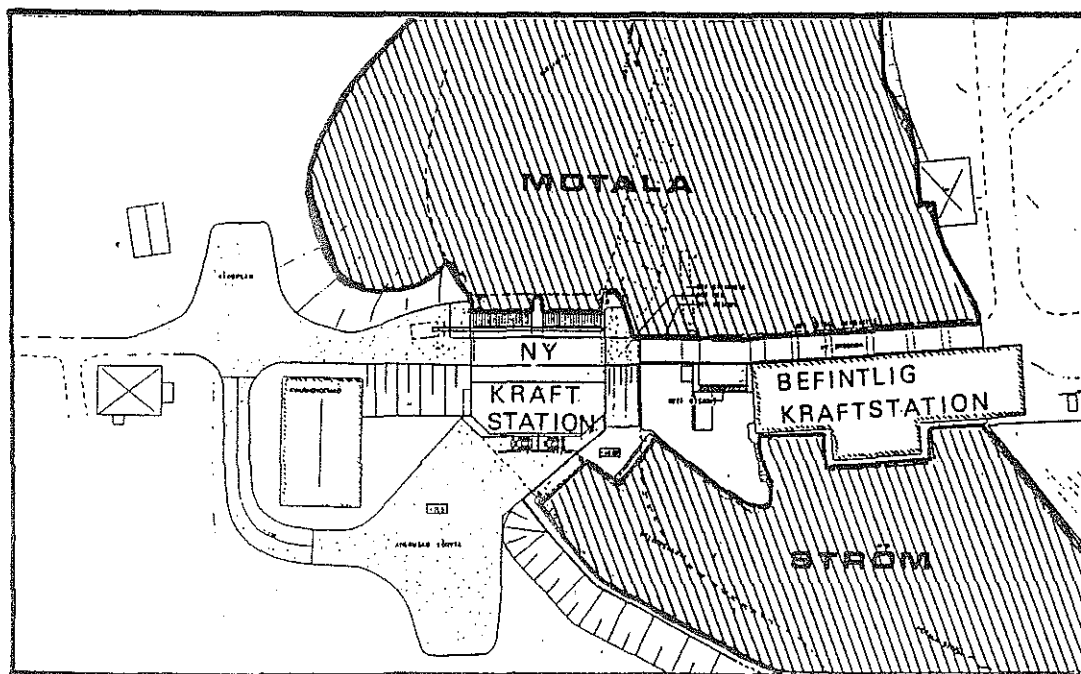
- Datormodellen är helt beroende av de matematiska metodernas förmåga att ge en bild av verkligheten. I en fysisk modell har man däremot möjlighet att observera verkligheten.
- Användaren av datormodellen måste vara väl insatt i teorin bakom programmet, och kunna tolka den stora mängden utdata på ett bra sätt.
- Det finns en stor kunskap om och erfarenhet av laboratorieförsök i fysiska modeller.
- Det är lättare för lekmän att förstå strömningsförhållanden och miljöpåverkan i en fysisk modell.

4. LABORATORIEFÖRSÖK

4.1 Bakgrund

Den fysiska modellen gjordes som ett examensarbete i vattenbyggnad på Chalmers Tekniska Högskola av Lars-Olof Frykenberger och Lars Nikell. Arbetet genomfördes 1987-1988 på uppdrag av ABV.

Inför en ombyggnad av Borensbergs kraftstation ville man göra modellstudier av olika tänkbara utformningar av kraftverkets intag och av botten-topografin strax uppströms kraftverket. För utförligare information hänvisas till skriften "Borensbergs kraftstation. En modellstudie av strömningsförhållanden" [2]. Modellen finns fortfarande på vattenbyggnadslaboratoriet på Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.



Figur 2. Situationsplan över Borensbergs kraftstation. Från [2].

4.2 Skalförhållanden modell - prototyp

Modellförsöken utfördes enligt Froudes modell-regel. Det innebär att Froudes tal skall vara lika i modell och prototyp [3].

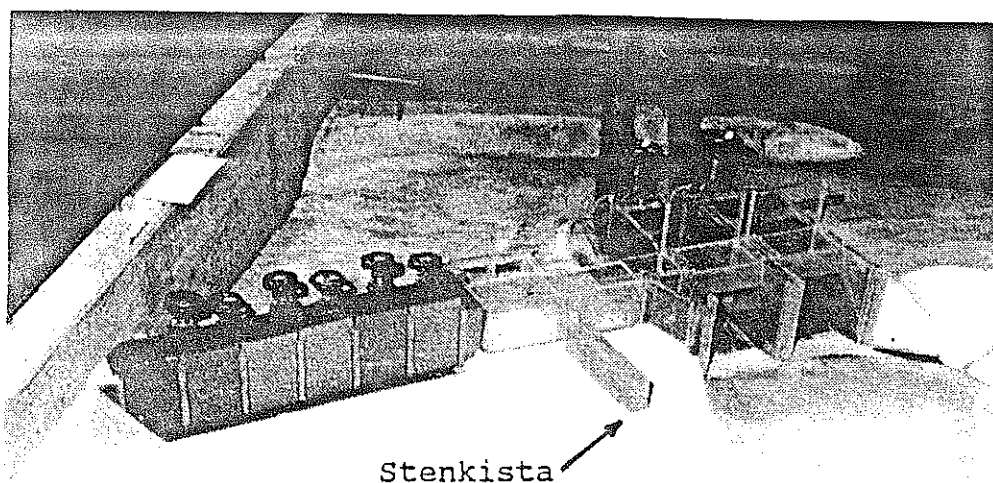
Modellen är i skala 1:40 och med Froudes modell-regel fås då följande skalförhållanden mellan modell och prototyp.

Längd	1:40
Tid	$1:40^{1/2}$
Hastighet	$1:40^{1/2}$
Flöde	$1:40^{5/2}$

I prototypen är utbyggnadsvattenföringen 92 m^3/s , vilket ger vattenföringen 9.1 l/s i modellen.

4.3 Utformning

Strömfåran i den fysiska modellen har en relativt regelbunden kanalform och längden 7.5 m. Bredden varierar mellan 1.4 och 2.2 m. Typiska djup är 0.1 m i strömfåran och 0.2 m vid kraftverkets intag. Modellbotten har utförts i målad betong. Uppströms den modellerade strömfåran finns ett område på 3 m², där vattendjupet är stort och låga vattenhastigheter råder. I nedströmsänden modelleras kraftstation och utskov med PVC-plast och plexiglas (fig. 3). Den nedre modellgränsen utgörs av de två ställbara ventiler som simulerar turbinerna. Modellen ligger i en ränna med måtten 11*3 m².

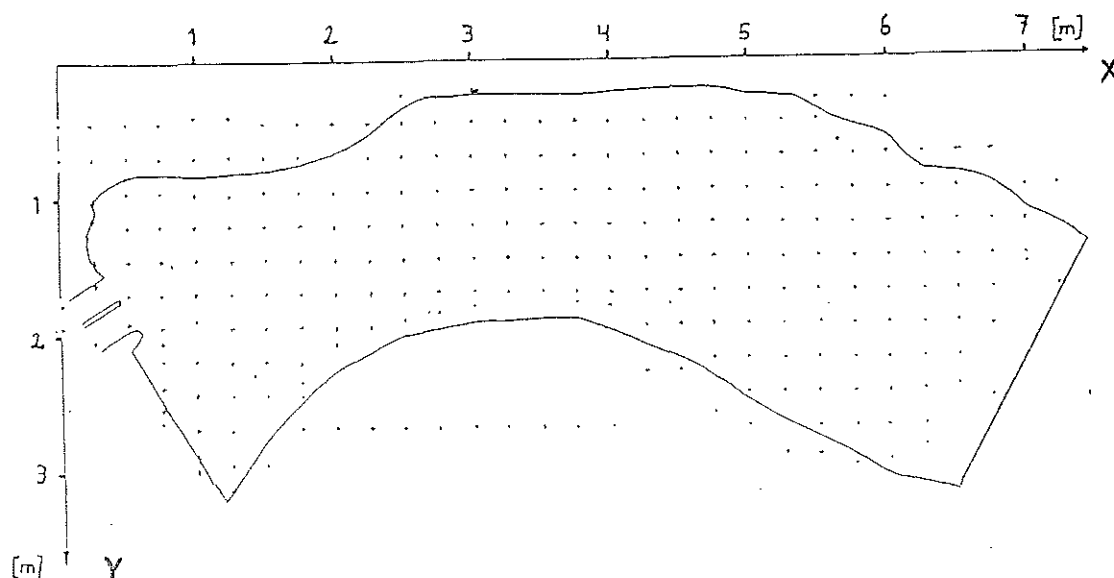


Figur 3. Modellkraftverk och utskov. Stenkistan mellan kraftverken togs bort vid laboratorieförsöken. Från [2].

Flödet in i modellen regleras med en ventil. Med en flödesmätare för rörströmning kan inflödet mätas med stor noggrannhet. Om vattenytans nivå är konstant är flödet lika stort i varje sektion i modellen. Samtliga laboratorieförsök gjordes vid vattenföringen 9.1 l/s.

4.4 Topografi

Då några egentliga ritningar över modellen inte stod att finna, blev vi tvungna att själva fastställa dess topografi. Det gjordes med hjälp av ett precisionsavvägningsinstrument med planplatta. Topografin bestämdes genom avvägning i ett rutnät där varje ruta hade sidan 25 cm. Oregelbundenheter i modellbotten gjorde att högre täthet krävdes i vissa områden.



Figur 4. Avvägda punkter.

4.5 Vattenytans nivå

För att bestämma vattenytans nivå användes ett precisionsavvägningsinstrument och en spetsmätare. Det var svårt att påvisa någon fallförlust över sträckan från inlopp till utlopp. Vi kunde dock konstatera att förlusten var mindre än 1 mm. Därför försummade vi den och antog att vattenytans nivå var konstant över hela modellen.

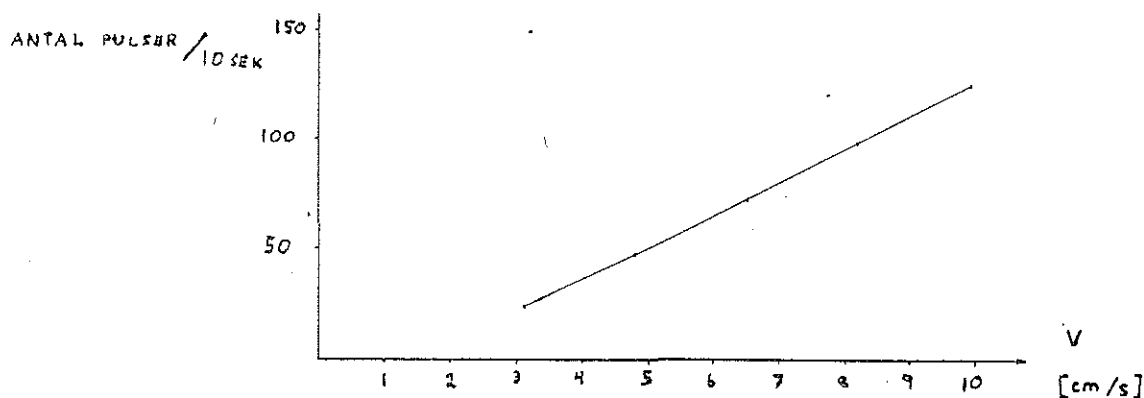
4.6 Strömningstillstånd

I ett vattendrag som Motala Ström råder turbulent strömning. Den orsakas av ojämnheter i och friktion mot botten. För att försöka modellera detta strömningstillstånd fäste man då modellen byggdes ett stort antal tunna, upprätt stående, pinnar i modellbotten. Den positiva effekten av att på detta sätt modellera turbulens är tveksam, eftersom pinnarna ger horisontella virvlar. I prototypen är virvlarna huvudsakligen vertikala eftersom det främst är botten som orsakar virvelbildning. Dessutom är pinnarna omöjliga att efterlikna i en datormodell, så vi tog bort alla utom dem i området allra längst uppströms. Det gjorde att vi fick tendenser till laminär strömning. Förmodligen beror det på att den fysiska modellen är alltför kort för att det turbulenta gränsskiktet ska utvecklas. Beräkningar [3] visar att utvecklingslängden för det turbulenta gränsskiktet är 9 m i vårt fall. Reynolds tal för modellen är $1.5 \cdot 10^4$, vilket är större än den gräns ($Re > 4 \cdot 10^3$) man brukar sätta som villkor för att turbulent strömning skall råda.

4.7 Mikroflygeln

För att mäta vattenhastigheten användes en mikroflygel. Den är propellerformad, med mycket liten massa och diametern 10 mm.

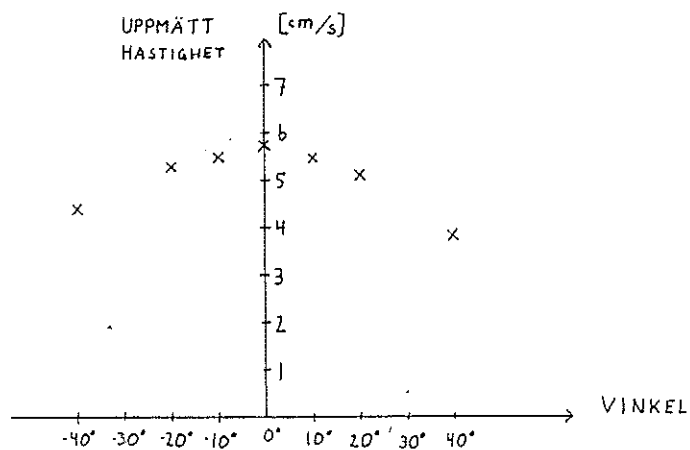
Mikroflygeln kalibrerades före varje ny mätserie, och vi kunde konstatera att instrumentet gav osäkra mätvärden vid hastigheter under 3 cm/s. Därför har lägre värden inte redovisats.



Figur 5. Kalibreringskurva för mikroflygeln.

Mikroflygeln är mycket känslig för föroreningar i vattnet, speciellt små fibrer, och måste kontrolleras regelbundet under mätningarna. Den kan också på kort tid samla på sig friktionsskapande oxidationsskikt. För att förhindra detta så förvarades den i vatten mellan mätningarna. Dessutom rengjordes den i en svag syralösning före varje kalibrering.

Ett annat problem var att mäta vattnets riktning och att göra hastighetsmätningar i rätt riktning. Ett fel på 10° i uppmätt vinkel ger ett fel i uppmätt hastighet på 5%, och ett fel på 20° ger 10%.



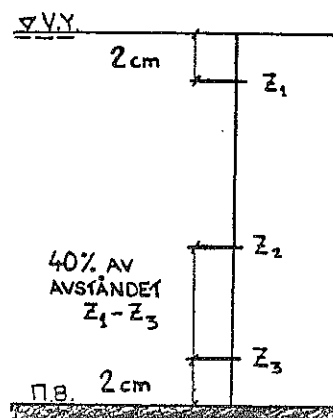
Figur 6. Uppmätta hastigheter vid sned anströmning mot mikroflygeln.

4.8 Hastighetsmätning

Vi mätte vattenhastigheten i 99 st mätpunkter i modellen. För att på ett bra sätt kunna beskriva det intressanta området strax uppströms intaget till kraftverket placerades mätpunkterna tätast där. I varje punkt mättes vattnets strömningshastighet och riktning för tre olika djup. Hastigheterna mättes för varje djup i alla mätpunkterna som ett medelvärde under 100 sekunder.

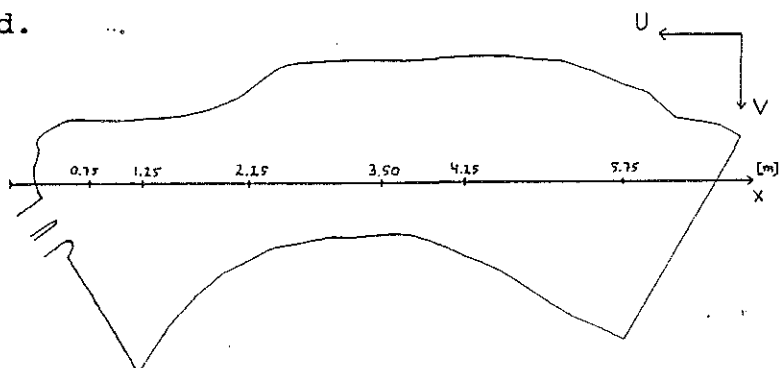
Strömningsriktningen erhöles genom att injicera en bläckstråle i mätpunkten. Mikroflygeln ställdes in efter riktningen på strålen och dess vinkel mättes med en på instrumentet monterad gradskiva.

Strömningshastigheterna mättes på de tre djupen Z_1 , Z_2 och Z_3 . Z_1 låg 2 cm under vattenytan, Z_2 2 cm över modellbotten och Z_3 mellan Z_1 och Z_2 på 40% av avståndet $Z_1 - Z_2$, mätt från Z_2 (fig. 7).

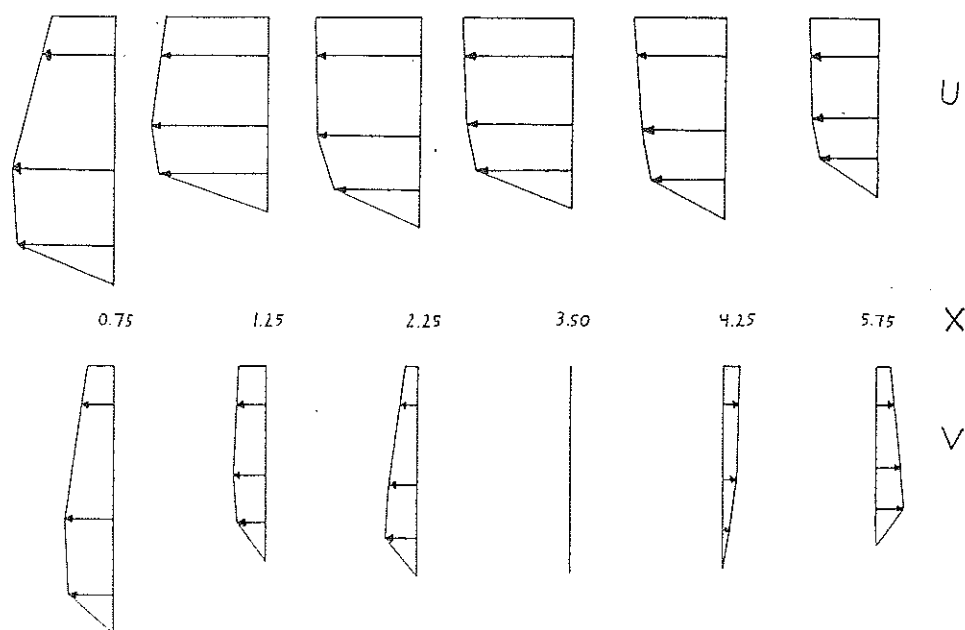


Figur 7. De djup där vattnets strömningshastighet mätts.

Som exempel på uppmätta hastigheter redovisas hastighetsprofilens utveckling längs linjen $Y=1.45$ m nedan. Eftersom strömningsriktningen varierar med djupet får hastigheten komposantuppdelas. U avser hastighetskomposant i X-led och V i Y-led.

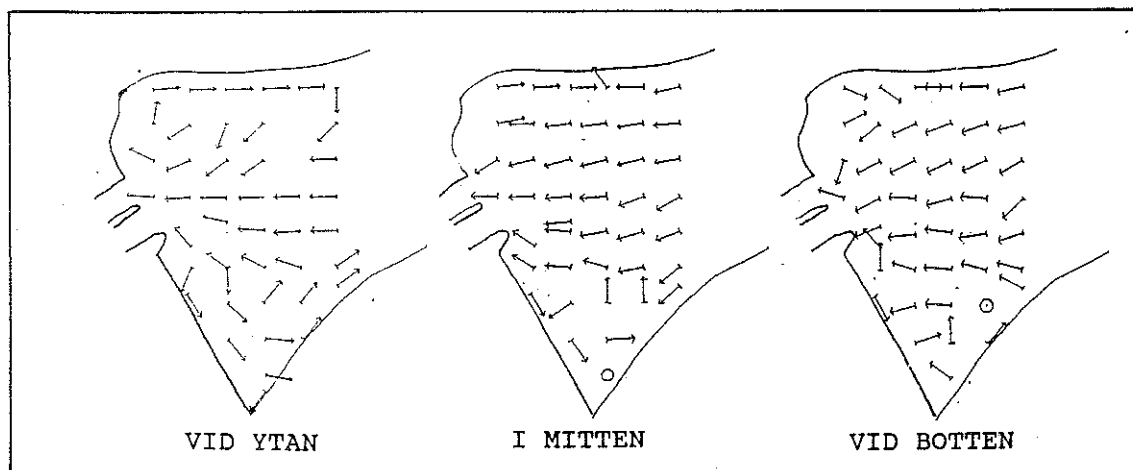


Figur 8. De punkter längs linjen $Y=1.45$ m där hastighetsprofilen redovisats, samt hastighetskomposanternas riktningar.



Figur 9. Hastighetsprofilens utveckling längs linjen $Y=1.45$ m. Hastigheten är komposantuppdeld i det globala, kartesiska koordinatsystemet. Pil riktad åt vänster anger positiv hastighet. 1 cm motsvarar en hastighet av 6.1 cm/s. Höjdsckalan är 1:4.

I de zoner där vattenhastigheten var så låg att den inte gick att mäta (lägre än 3 cm/s), bestämdes endast strömningsriktningen. Det var nödvändigt för att kunna beskriva de två stora horisontalvirvlarna (fig. 10) på bägge sidor om intaget till det nya kraftverket. Strömningsriktningen bestämdes genom att vi injicerade en bläckstråle på respektive djup i varje mätpunkt.



Figur 10. Strömningsriktningar strax uppströms kraftverket, uppmätta vid ytan, mitt i och vid botten. Riktningarna mättes vid pilarnas bas.

Vid mätningarna i laboratoriet kunde vi konstatera att vattnets hastighet och riktning varierar i tiden. Hastigheten mättes dock över 100 sekunder och det är en avsevärt längre tid än varaktigheten på de instationära fenomen som observerats vid laboratorieförsöken.

5. DATORMODELL

5.1 Allmänt

Vi gjorde datorberäkningarna med datorprogrammet PHOENICS. Det är ett program för lösning av en uppsättning generella differentialekvationer. Utseende och kopplingar mellan differentialekvationerna styrs genom indata. Man har möjlighet att simulera flera olika fenomen, t.ex. fluidströmning, värmeledning och kemiska reaktioner [4], [5], [6].

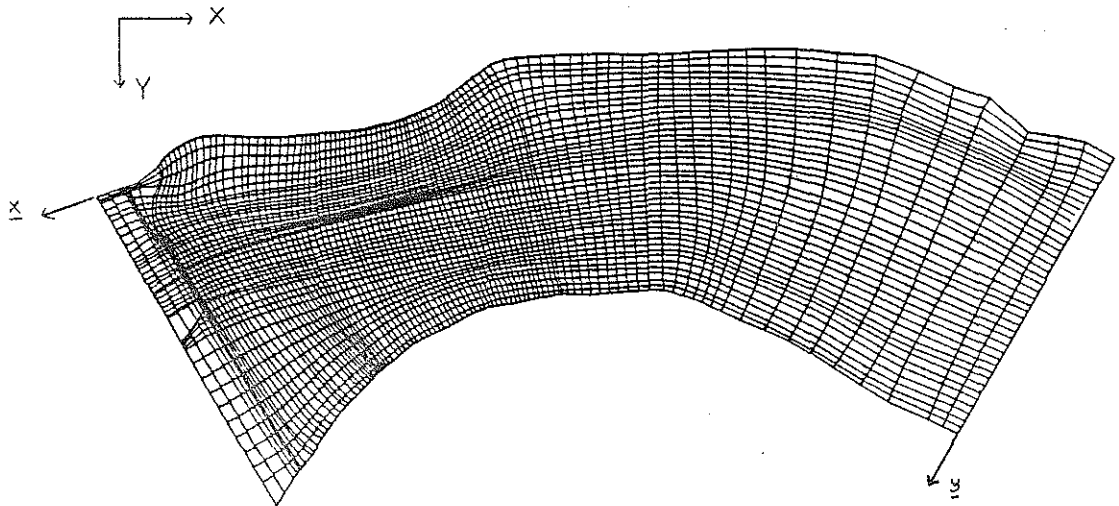
PHOENICS utvecklades i England 1979-80 under ledning av D B Spalding och kom ut på marknaden 1981. En större omarbetning skedde 1984. Sedan dess har flera versioner släppts, och programmet är under kontinuerlig utveckling.

Vattenfall använder PHOENICS vid beräkning av strömningshastigheter i älvfåror då man projekterar rensning av älvar. PHOENICS används också vid studier av strömningen genom dammkroppar, och man har ett forskningsprojekt på datorberäkningar av isbildning och transport av is i älvfåror och magasin. I de här fallen används framförallt tvådimensionella datormodeller. Nackdelarna med det uppvägs delvis av att man kan variera cellernas djup och på så vis får med den inverkan som varierande vattendjup har på strömningsskilderna. Vidare använder Vattenfall PHOENICS vid beräkningar för slutna rörsystem i industrier och kärnkraftverk.

5.2 Geometri

Vi skapade en tvådimensionell datormodell för att efterlikna den fysiska modellen. Modellområdet delades i planet in i 98 celler i x -led och 41 celler i y -led med finast cellindelning i området strax uppströms kraftverkets intag (fig. 11). Sidan på en cell där var ca 4 cm.

Med x -led menas här ett koordinatsystem som följer cellernas avgränsningar i huvudströmriktningen. På motsvarande sätt i y -led tvärs huvudströmriktningen. Detta kallas det lokala koordinatsystemet, och det utgår från datormodellens övre högra hörn. Det globala koordinatsystemet, här kallat X och Y , är ett kartesiskt koordinatsystem med origo ovan och till vänster om modellen enligt figuren nedan.



Figur 11. Cellindelning i datormodellen, samt orientering för de globala och lokala koordinatsystemen.

Cellernas utsträckning i z -led bestämdes av vattendjupet i varje cellhörn. Djupet linjärinterpolerades fram från mätningarna i den fysiska modellen under antagandet att vattenytans nivå var konstant.

Geometrin i datormodellen beskrevs med Body Fitted Coordinates. Det innebär att cellerna inte behöver vara helt rektangulära, utan kan följa den verkliga geometrin på ett tillfredställande sätt. Vid beräkningarna är det dock till fördel, om de linjer som delar in cellerna korsar varandra i så rät vinkel som möjligt.

5.3 Randvillkor

I uppströmsänden gavs den hastighetsfördelning som mätts upp i den fysiska modellen som randvillkor till datormodellen. Hastigheterna korrigerades något för att flödet genom varje sektion i datormodellen skulle bli det samma som i den fysiska modellen. Vid laboratoriemätningarna mättes ju inflödet med mycket större noggrannhet än hastigheten.

I nedströmsänden sattes vattnets trycknivå till noll vid datormodellens nedre rand, dvs i cellraden $x=98$. Det motsvarar i den fysiska modellen läget för de ventiler som simulerar turbinerna, dvs 0.3 m nedströms intaget till kraftverket. Vattentrycket uttrycks i de datorberäkningar som vi gjorde som ett referenstryck och motsvarar därmed vattenytans nivå.

5.4 Datorberäkningar

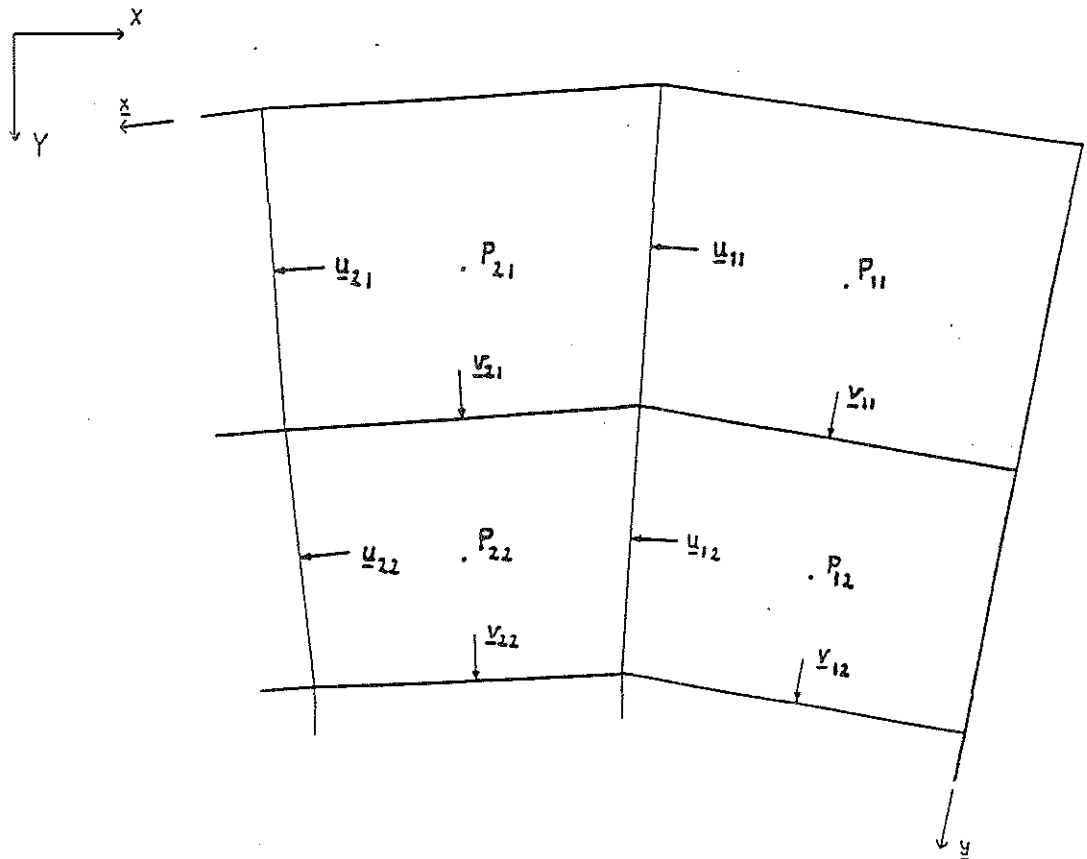
Indatafilen, som i PHOENICS-manualerna kallas Q1 (bil. 2), styr ekvationernas utseende, antalet iterationer, utdata, randvillkor, bottenfriktion, strömningstyp osv.

Vid datorberäkningen varierades vattnets turbulenta virvelviskositet samt friktionen mot botten. Bottenfriktionen varierades i intervallet $[-6.0, -0.1]$, där -6 anger störst friktion. Vattnets turbulenta virvelviskositet, ϕ , som har dimensionen m^2/s , varierades i intervallet $[1 \cdot 10^{-5}, 1 \cdot 10^{-2}]$.

5.5 Utdata

PHOENICS ger som utdata ett referenstryck, P , mitt i cellerna. Man får också hastigheter över gränsen mellan cellerna, u och v , i det lokala koordinatsystemet x och y .

När man använder Body Fitted Coordinates kan också hastighetsresultanter, U och V , beräknas. De är då komposantuppdelade i det globala, kartesiska koordinatsystemet.



Figur 12. Cellindelning och orientering för tryck och hastigheter vid Body Fitted Coordinates.

5.6 Praktiska erfarenheter av PHOENICS

Det var svårt att lära sig att använda PHOENICS på ett tillfredställande sätt på den korta tid som vi hade avsatt för datorberäkningar. För att kunna göra indatafilen (bil. 2) skall man helst ha en fil till hands, från ett fall som liknar det man själv vill beräkna.

Geometrin i datormodellen ges som koordinaterna (X, Y och Z) för hörnen i varje cell. För koordinaterna i planet, X och Y, ordnas det på ett smidigt sätt genom att de läses in till en datafil från ett digitaliseringsbord. För att ge höjden på hörnen i varje cell måste man interpolera fram den ur mätresultat från den geometri man vill modellera. Kanske var vi lite väl ambitiösa när vi delade in modellen i 4018 celler, för det innebar ju att vi måste interpolera fram djupet i 4158 cellhörn. Det var ett mycket omfattande arbete. Dessutom blir tiden för datorberäkningen ganska lång när man använder en datormodell med så många celler, bl.a därför att det krävs fler iterationer innan konvergens uppnås. I de beräkningar vi gjorde sattes antalet iterationer till 700. Efter 450 iterationer konvergerade hastigheterna i tredje siffran. Den motsvarar i de flesta fall 10^{-4} m/s. Trycket konvergerade i andra siffran, motsvarande 10^{-2} mm i tryckhöjd, efter 670 iterationer.

6. JÄMFÖRELSE

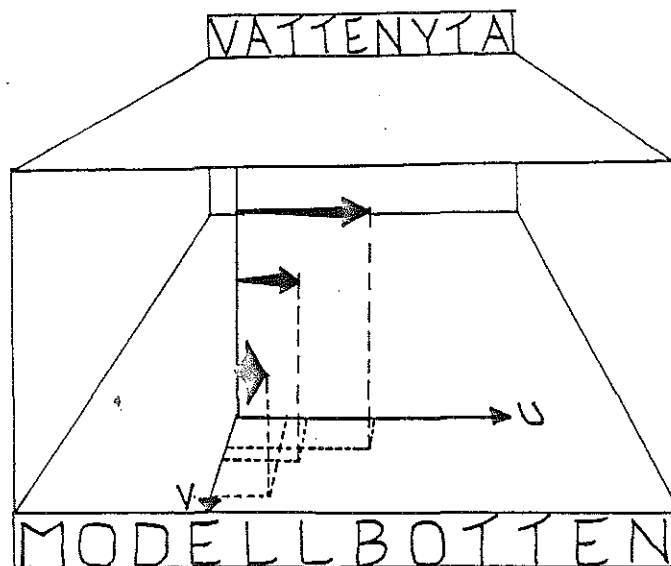
6.1 Jämförelsevärden för hastigheten

När strömningsbilden i den fysiska modellen mätts upp kunde vi konstatera att vattnets hastighet och riktning är olika för de tre djupen, Z_1 , Z_2 och Z_3 . Datorberäkningarna gjordes dock i två dimensioner med en enda cell i djupled. Det gör att man som utdata får hastigheten vertikalintegrerad över djupet, alltså en enda hastighet i varje punkt. Den är dessutom komposantuppdeldad. För att kunna jämföra datorberäkningar och mätningar måste man då beräkna någon form av medelvärde på de hastigheter som mätts upp i varje punkt. Det gjordes på följande sätt.

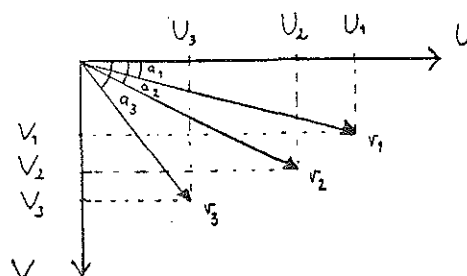
Vi delade upp hastigheten i komposanter (fig. 13 och 14) så att

$$\begin{aligned}U_1 &= v \sin a_1 \\U_2 &= v \sin a_2 \\U_3 &= v \sin a_3 \\V_1 &= v \cos a_1 \\V_2 &= v \cos a_2 \\V_3 &= v \cos a_3\end{aligned}$$

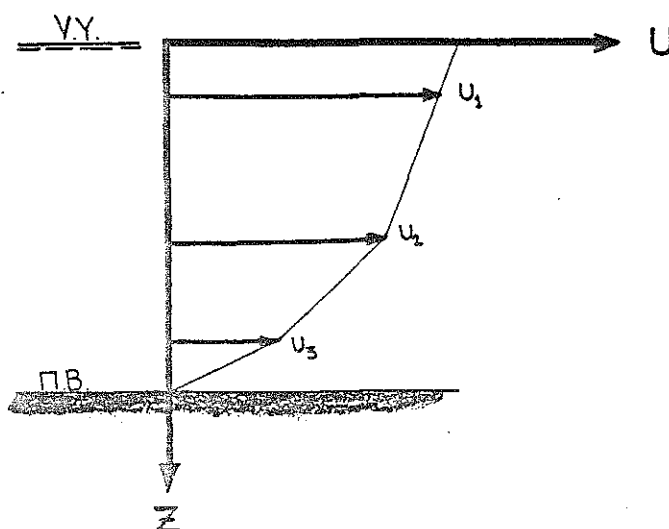
Vi antog hastigheten noll vid botten och att den varierade linjärt mellan komposanterna. Hastighetsfördelningen enligt detta antagande framgår av figur 15. Utifrån den beräknade vi medelvärdet av hastighetkomposanterna i respektive riktning. Detta gav komposanterna U och V , som vi kunde jämföra med hastigheter som beräknats i det globala koordinatsystemet i datormodellen.



Figur 13. Exempel på uppmätta hastigheter och vinklar.



Figur 14. Komponentuppdelning av uppmätta hastigheter i horisontalplanet.

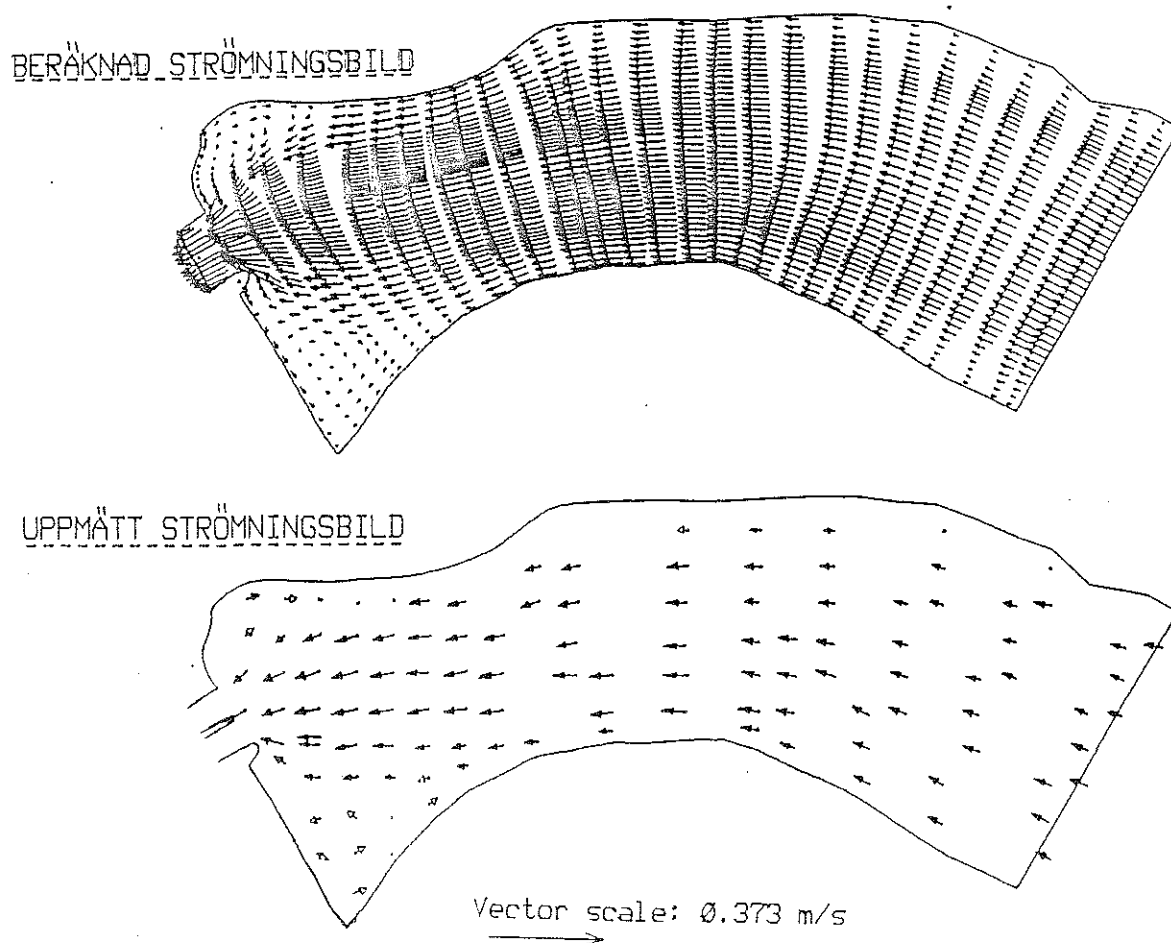


Figur 15. Resultat av komponentuppdelningen. Hastighetskomponenter i X-led.

6.2 Hastigheter

För att se hur väl datorberäkningarna i PHOENICS stämmer med den verkliga strömningsbilden i den fysiska modellen jämförs här resultaten från beräkningarna med de uppmätta hastigheterna.

De parametrar som varierades vid datorkörningarna var vattnets turbulenta virvelviskositet, Φ , och friktionen mot botten.



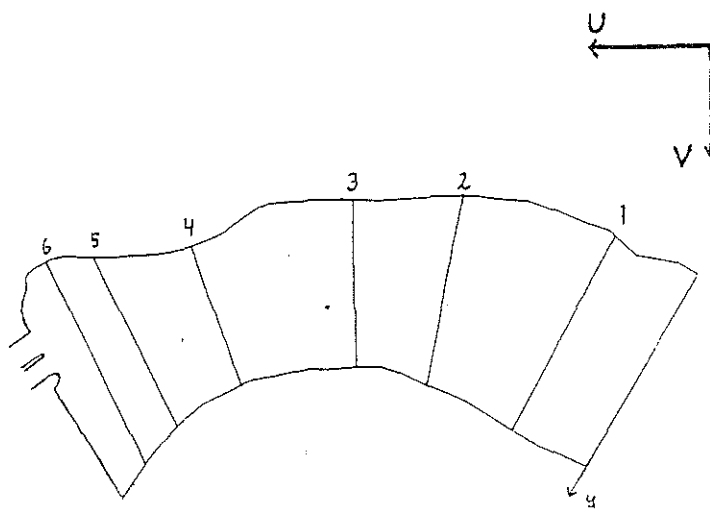
Figur 16. Strömningsbild beräknad med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, bottenfriktionen -3 överst, och uppmätt strömningsbild. Vektorskalan är den samma i båda fallen.

När man jämför den storskaliga strömningsbilden (fig. 16) kan man konstatera att datormodellen, beräknad med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen -3 , stämmer väl överens med laboratiemätningarna, både till storlek och riktning. Längst uppströms i den fysiska modellen kan man dock se att vattnet strömmar lite mer rakt mot kraftverket än vad som beräknats i datormodellen.

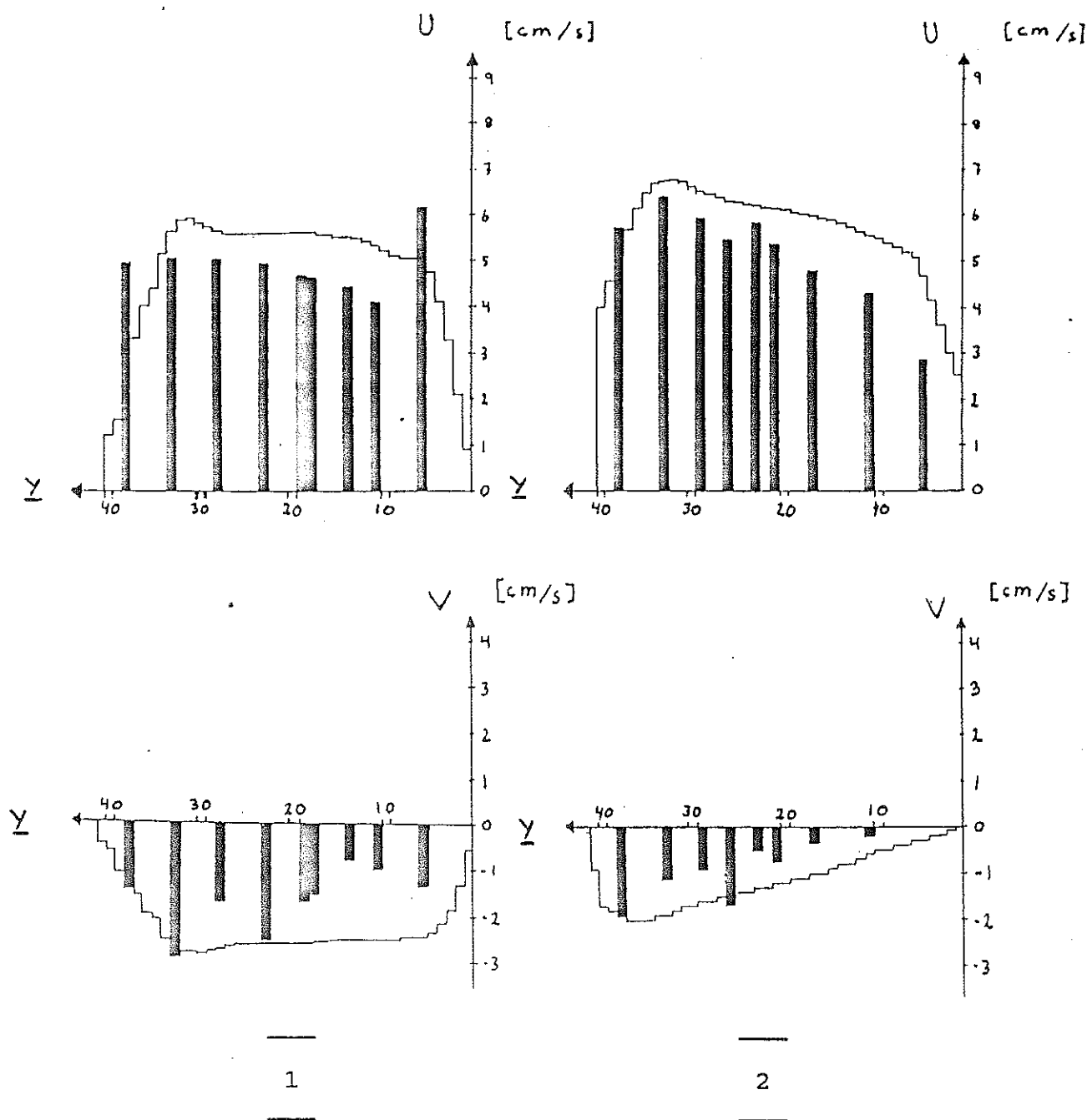
Långt uppströms kraftverket är skillnaderna mellan de olika datorkörningarna små, och hastighetsfördelningen förändras marginellt då parametrarna varieras. På de avstånd från stränderna där vi har mätt hastigheten i den fysiska modellen är skillnaden mellan de olika datorkörningarna så liten att man inte kan avgöra vilken som stämmer bäst överens med mätningarna. Närmare kraftverket minskar hastigheten längs stränderna med ökande friktion och minskande Φ , samtidigt som virvlarna på bägge sidor om intaget då blir kraftigare.

För att man närmare skall kunna studera hastighetsfördelningen har beräknad och uppmätt hastighet ritats upp i några sektioner enligt figurerna 18-20. Här användes resultaten från datorberäkningarna med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen -3 . Liksom när man jämför den storskaliga strömningsbilden, kan man här konstatera att hastighetsfördelningen i sektion 1, längst uppströms, stämmer sämre än för sektionerna längre ner. Det beror troligen på att vi som indata i uppströmsänden gav hastigheten vinkelrätt mot datormodellens övre gräns. Vi satte alltså hastigheten i y -led till 0 och den hastighet som mätts i den fysiska modellen angavs i x -led. Därför blev inte strömningsriktningen längst uppströms

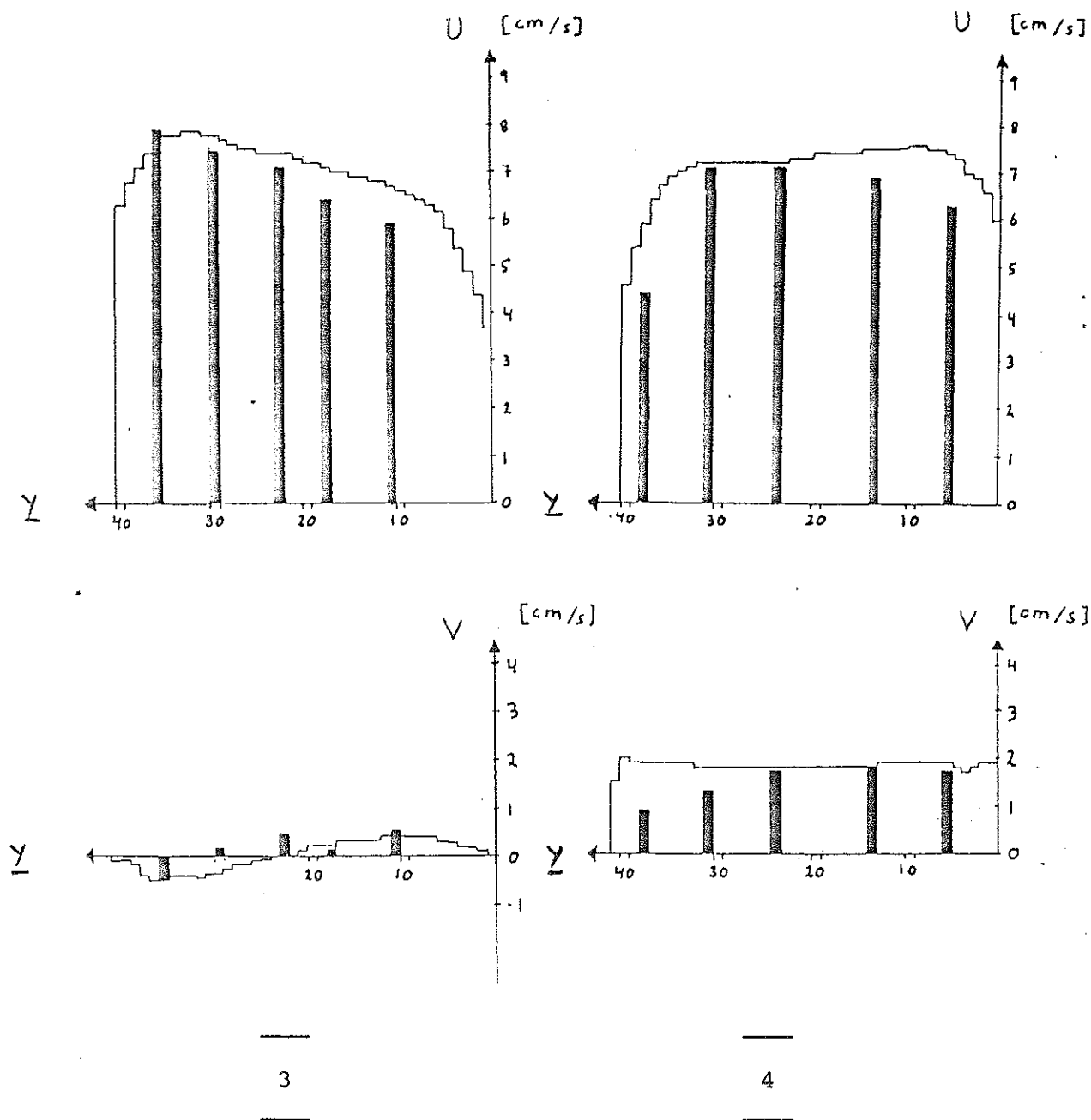
precis som den vi mätt upp i den fysiska modellen.
För sektionerna 2-6 stämmer datormodellen väl med
den fysiska modellen, speciellt i X-led.



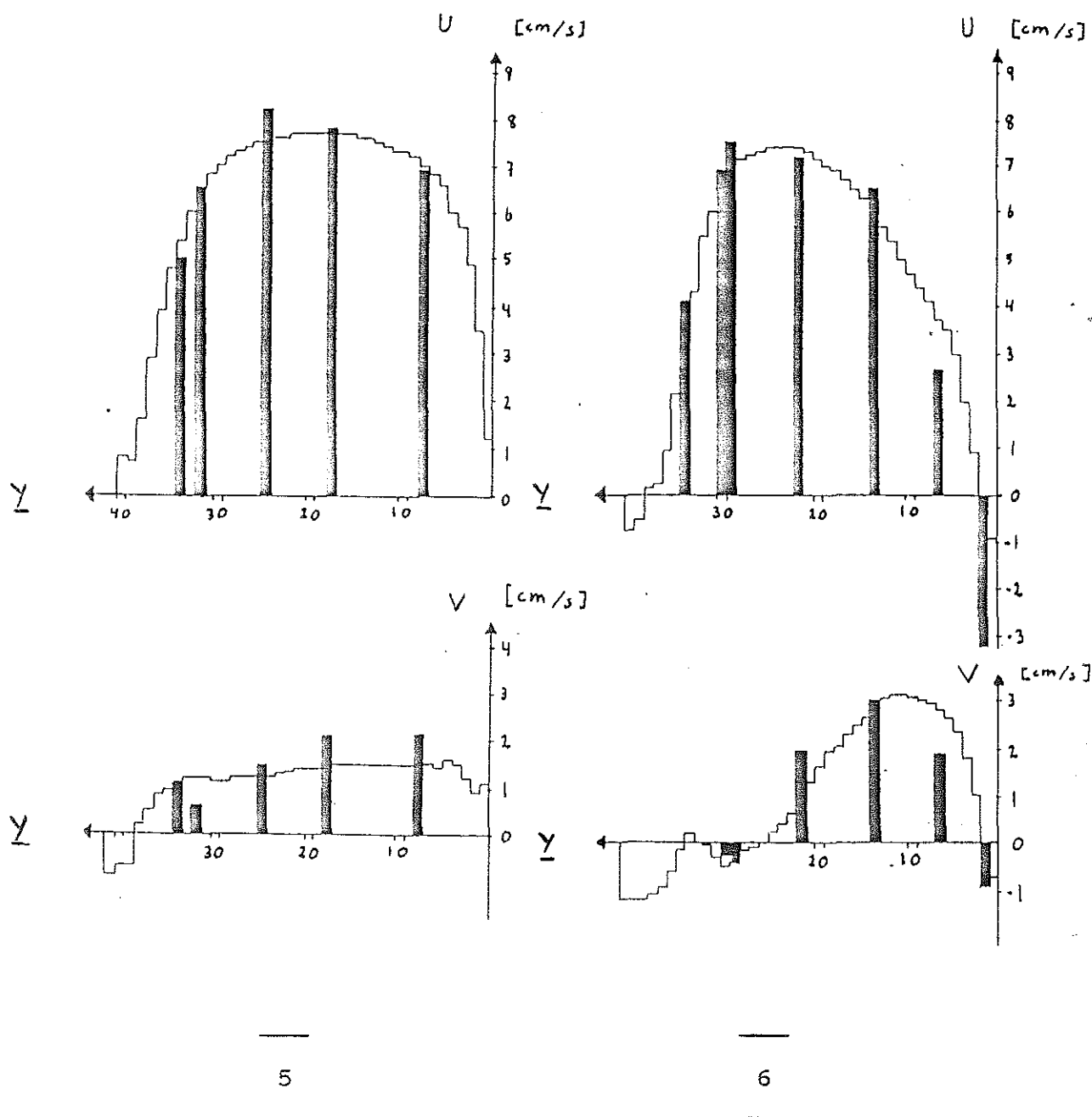
Figur 17. De sektioner där hastighets-
fördelningen ritats upp samt
orientering för hastighets-
komposanterna U och V.
y avser här cellnumrering tvärs
strömfåran.



Figur 18. Beräknad och uppmätt hastighetsfördelning i det globala koordinatsystemet för sektion 1 och 2. Fyllda staplar anger uppmätta hastigheter. y avser här cellnumrering tvärs strömfåran.



Figur 19. Beräknad och uppmätt hastighetsfördelning i det globala koordinatsystemet för sektion 3 och 4. Fyllda staplar anger uppmätta hastigheter. y avser här cellnumrering tvärs strömfåran.



Figur 20. Beräknad och uppmätt hastighetsfördelning i det globala koordinatsystemet för sektion 5 och 6. Fyllda staplar anger uppmätta hastigheter. y avser här cellnumrering tvärs strömfåran.

6.3 Lugnvattenområden.

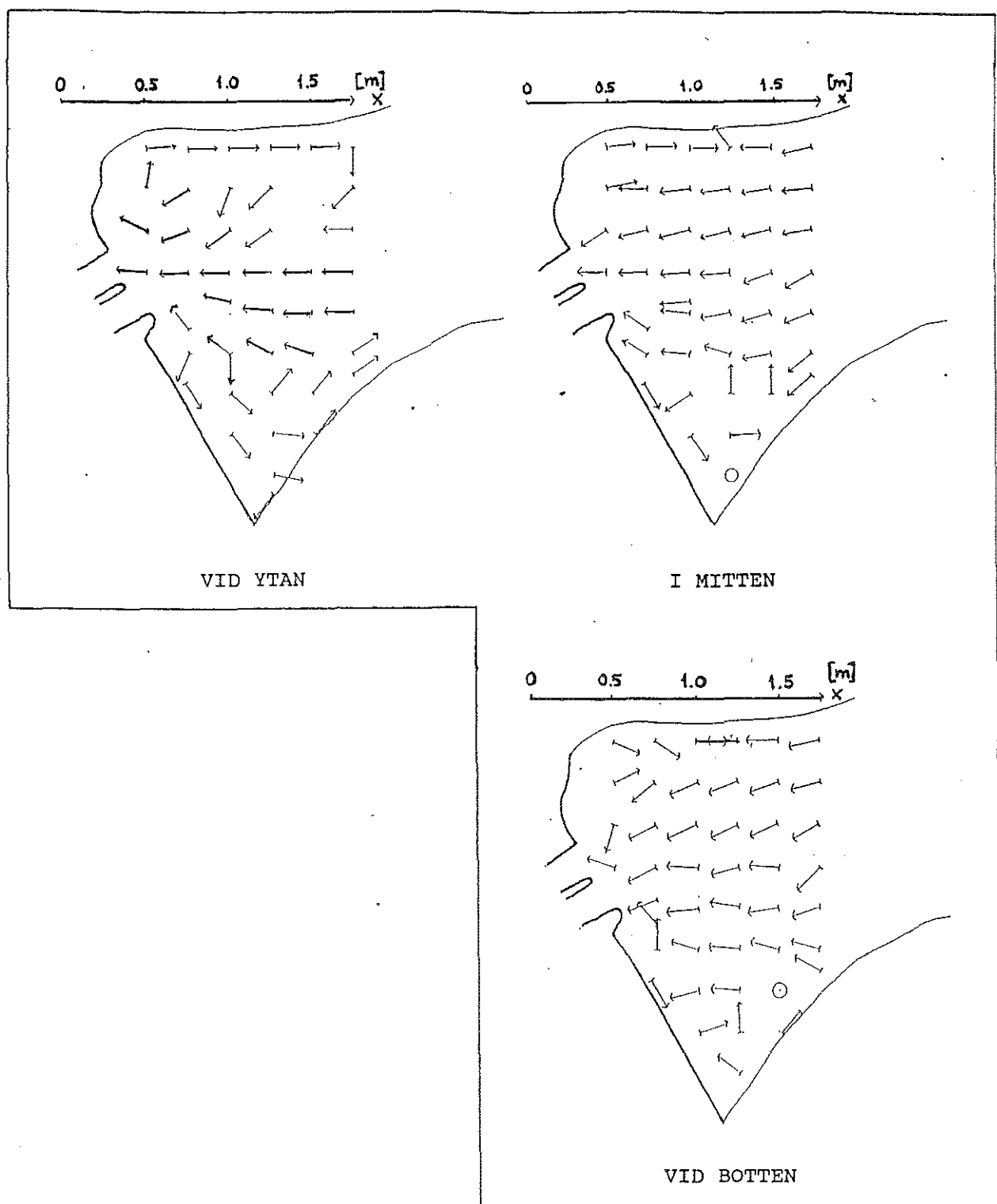
På bägge sidor om intaget till det nya kraftverket bildades två stora, långsamma virvlar i den fysiska modellen. Hastigheten var här så låg att den inte gick att mäta med tillgängliga instrument. Därför blev vi vid jämförelsen tvungna att förlita oss enbart till resultaten från mätningen av strömningsriktningar (fig. 21). Den gjordes på tre olika nivåer; vid ytan, mitt i och vid botten.

I den fysiska modellen beror virvlarnas utsträckning av vilket vattendjup man mäter på. Både den vänstra och den högra virveln är större vid ytan än i mitten och vid botten. Det beror på att de ventiler som släpper ut vattnet ur modellen genom det modellerade kraftverket ligger nära botten. I figur 9 ser man att vattendjupet är större för $X=0.75$ än för $X=1.25$. Det gör att vattenhastigheterna minskar. Eftersom ventilerna ligger nära botten minskar hastigheten vid ytan mer än vid botten då vattnet närmar sig intaget. När vattnets hastighet minskar är förmågan till virvelbildning större, och man får kraftigare virvelbildning vid ytan än vid botten. Fenomenet är tydligast för den högra virveln (fig. 21). I mitten och på botten når den upp till $X=1.2$ m, men i ytan når den ända upp till $X=1.6$ m.

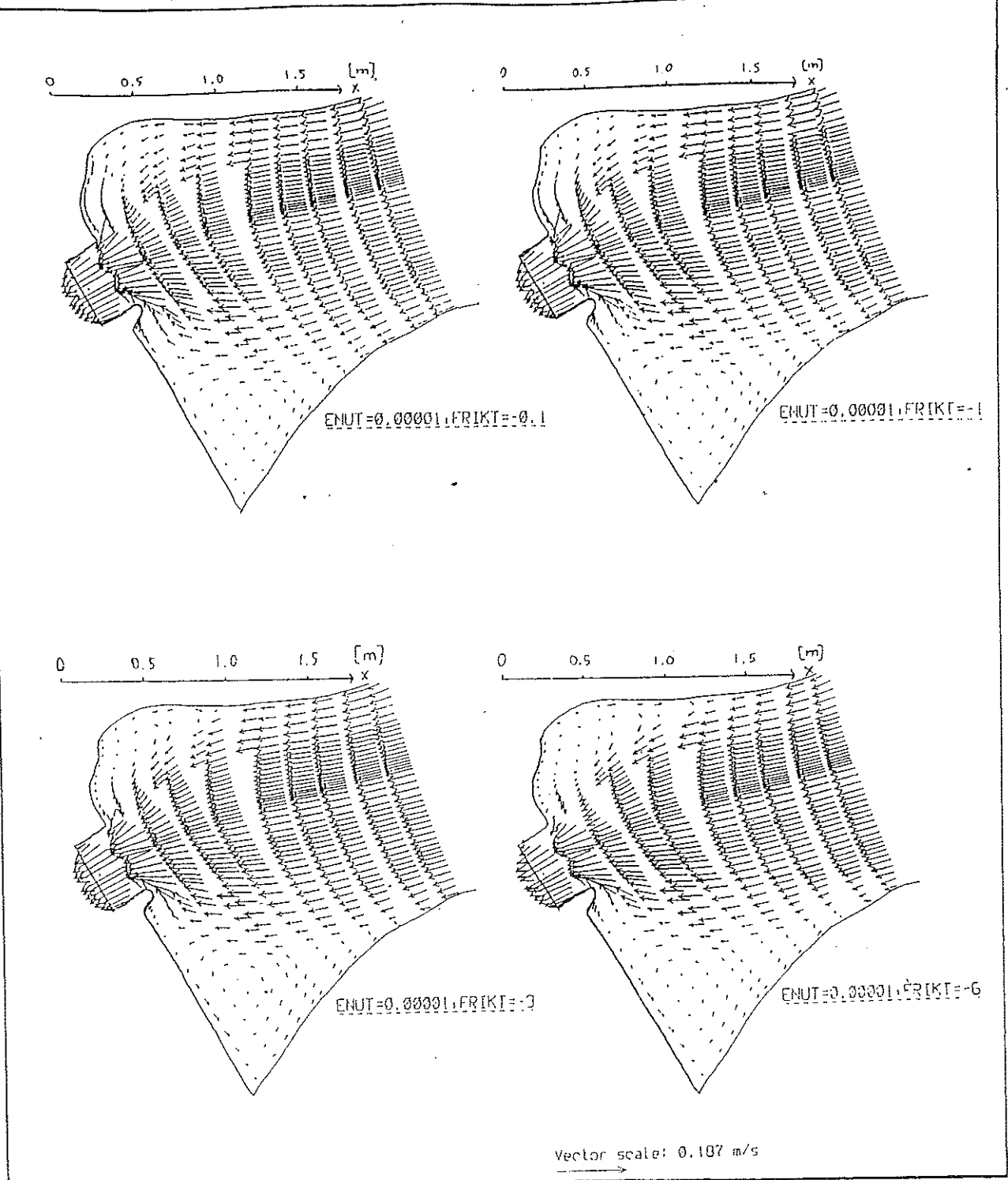
I resultaten från datorkörningarna finner man ingen tendens till virvelbildning för $\Phi = 1 \cdot 10^{-2}$ och $\Phi = 1 \cdot 10^{-3}$ m²/s (fig. 24-25). Den vänstra virveln framträder för $\Phi = 1 \cdot 10^{-4}$ och $\Phi = 1 \cdot 10^{-5}$ (fig. 22-23). Virvelcentrums läge ändras lite då parametrarna varieras och stämmer väl med den fysiska modellen.

Den högra virveln framträder med $\Phi = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ för bottenfriktionen -6 och -3 (fig. 23) och med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ för bottenfriktionen -6, -3 och -1 (fig. 22). Med ökande bottenfriktion och minskande Φ når den allt längre uppströms.

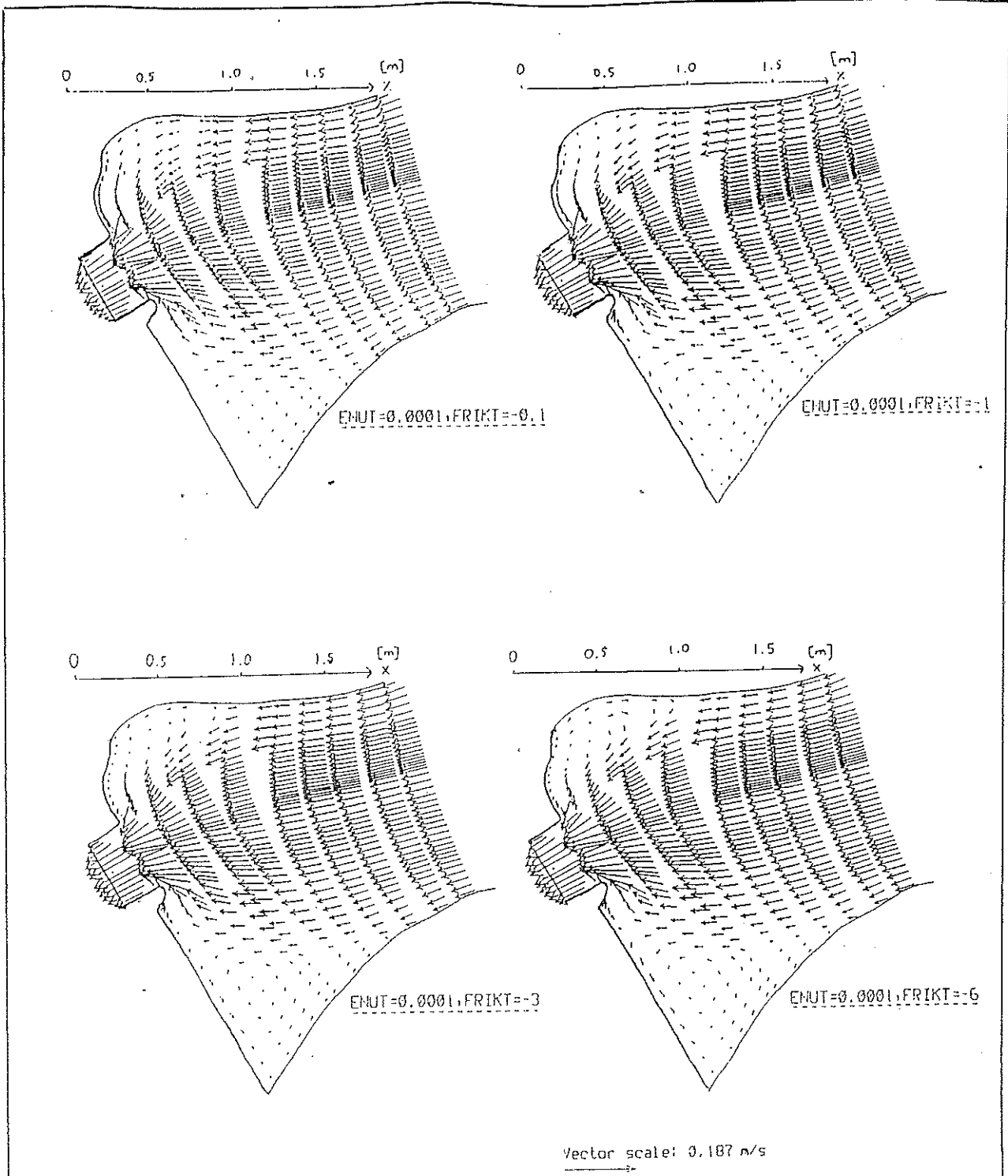
Eftersom vi har använt en tvådimensionell datormodell får vi inte med effekten av att hastigheten förändras olika på olika djup. Om man bortser från mätningarna vid ytan måste slutsatsen bli att den beräknade strömningsbilden, med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen -6, stämmer bra med avseende på bägge virvlarna.



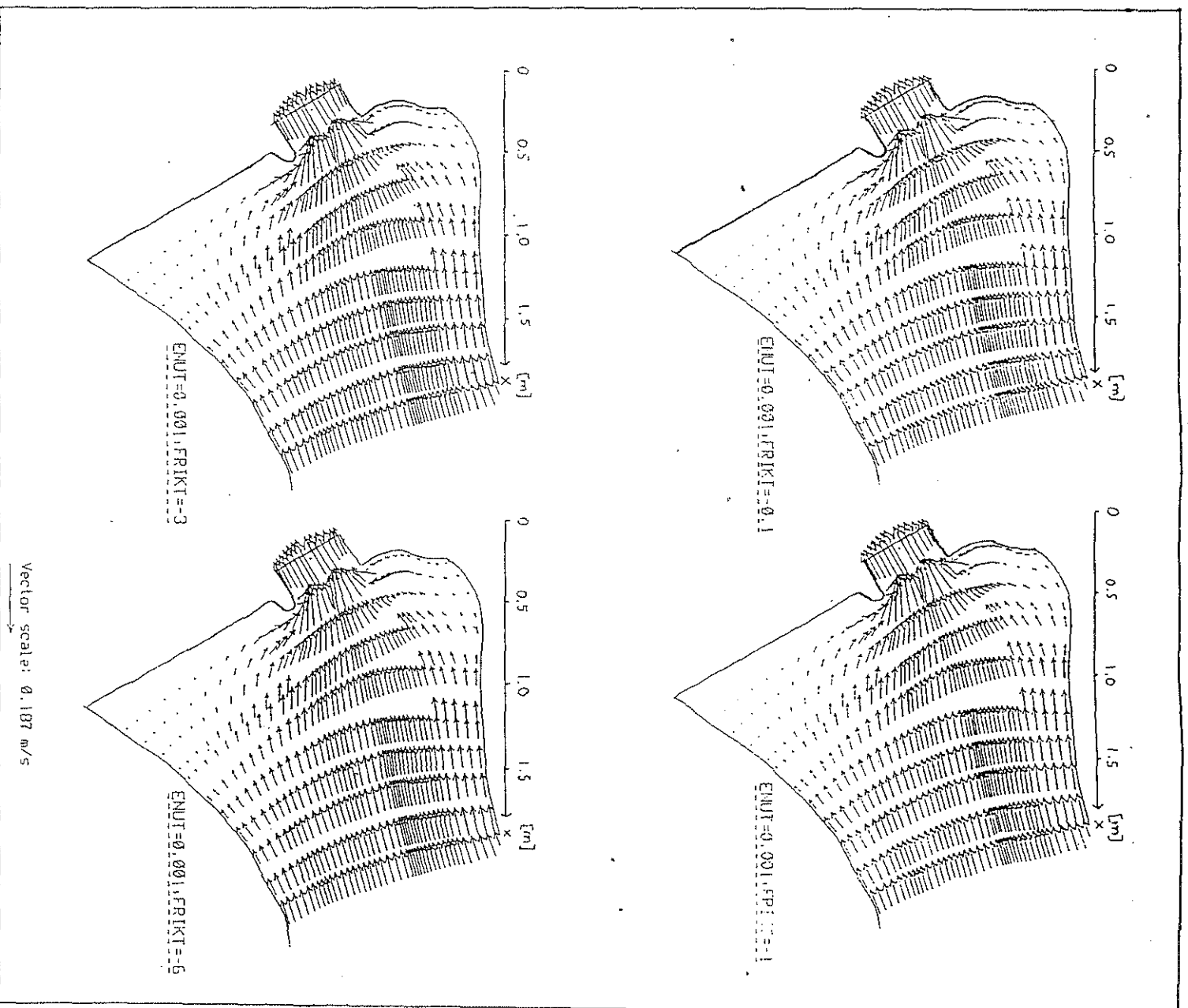
Figur 21. Uppmätta strömningsriktningar vid ytan, mitt i och vid botten. Strömningsriktningen mättes vid pilarnas bas. Cirkel anger att ingen riktning kunde mätas.



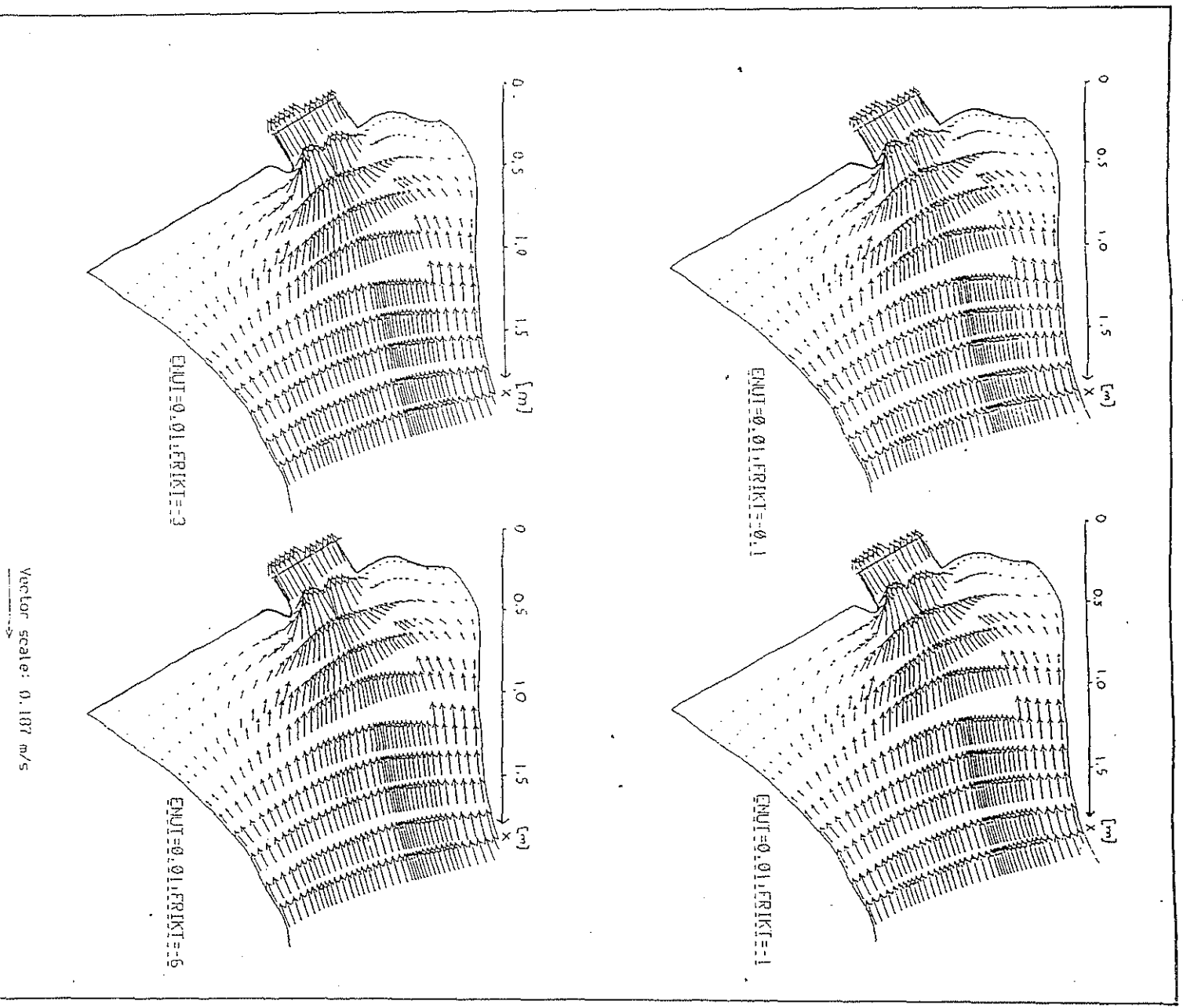
Figur 22. Strömningsriktningar strax uppströms kraftverket, beräknade för $\Phi = 1 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Den vänstra virveln är utvecklad för samtliga beräkningar, och den högra för alla utom friktionen -0.1. Pilarnas mittpunkt ligger mitt i cellerna.



Figur 23. Strömningsriktningar strax uppströms kraftverket, beräknade för $\Phi = 1 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Den vänstra virveln är utvecklad för samtliga beräkningar, och den högra för friktionen -3 och -6. Pilarnas mittpunkt ligger mitt i cellerna.



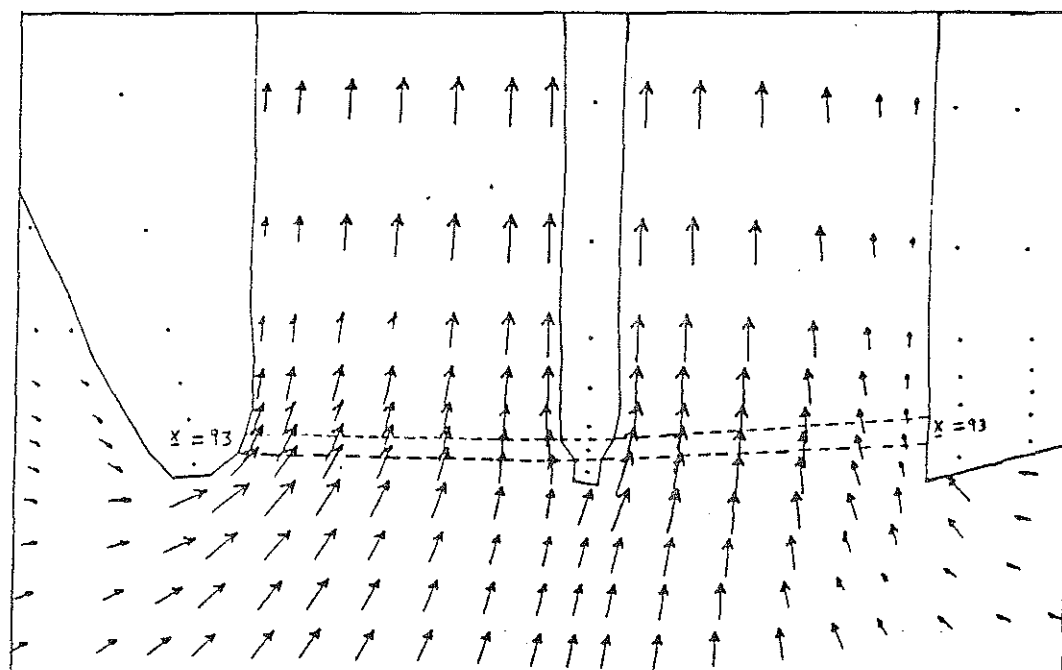
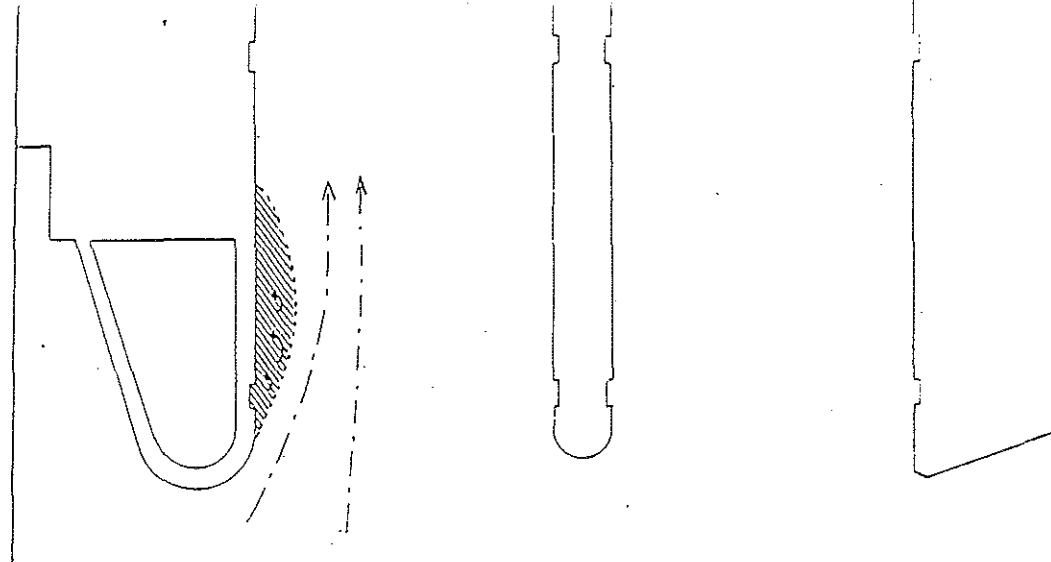
Figur 24. Strömningsriktningar strax uppströms kraftverket, beräknade för $\phi = 1 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Ingen virvelbildning. Pilarnas mittpunkt ligger mitt i cellerna.



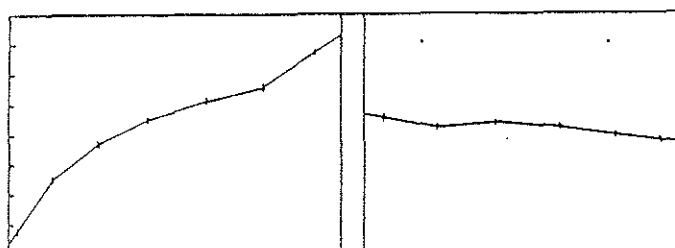
Figur 25. Strömningsriktningar strax uppströms kraftverket, beräknade för $\phi = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Ingen virvelbildning. Pilarnas mittpunkt ligger mitt i cellerna.

6.4 Avlösningsszon vid intaget

En avlösningsszon, med en moturs riktad virvel, observerades i den fysiska modellen vid det vänstra intagets vänstra vägg. Den är utförligare behandlad i [2]. I de strömningsbilder som beräknats med datormodellen kan man inte se virveln. Den är liten och cellerna i datormodellen är alltför stora för att kunna beskriva hastigheterna i virveln. Man kan dock se en antydning till avlösningsszon om man studerar tryckfördelningen i intaget (fig. 26). Trycknivån, som i det här fallet kan uppfattas som vattenytans nivå, är låg invid vänstra intagets vänstra vägg.



Varje
delstreck
motsvarar
0.2 mm.



Figur 26. Plan över fysisk modell överst,
strömnings bild beräknad för $\phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och friktionen -3 i mitten
samt tryckfördelning (vattenytans
nivå) för cellerna $x=93$ nederst. Det
låga trycket vid vänstra väggen
antyder att en virvel kan uppstå.

6.5 Friktionsförluster

Vid projektering av vattenkraftverk strävar man naturligtvis efter att utnyttja så stor del av fallhöjden som möjligt i turbinerna. Det görs bl.a genom att hålla förlusterna uppströms och nedströms kraftverket så små som möjligt. Det kan vara frågan om accelerationsförluster eller friktion i virvlar och mot botten. Därför är det intressant att undersöka hur förlusterna i datormodellen ändras när man varierar indataparametrarna.

Det finns flera sätt att uppskatta friktionsförlusterna i datormodellen. Energin i varje cell kan, om korrektionsfaktorn för ojämn hastighetsfördelning, α , sätts till 1, [3] tecknas som

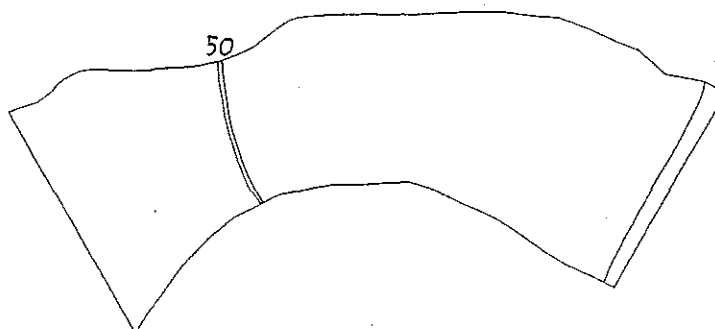
$$H(\underline{x}, \underline{y}) = P / (\rho * g) + (\underline{u}^2 + \underline{v}^2) / 2g.$$

$\underline{u}$ och $\underline{v}$ är hastighetskomponenter i det lokala koordinatsystemet, $\underline{x}$ och $\underline{y}$. P är trycket i cellen, g allmänna gravitationskonstanten och ρ vattnets densitet.

Man kan bestämma friktionsförlusten i längsled om man delar in strömfåran i strömrör med ett rör för varje cell i y -led. Förlusten mellan sektionerna $\underline{x}=1$ och $\underline{x}=50$ kan för varje strömrör beräknas som

$$dH_{1-50} = H(1, \underline{y}) - H(50, \underline{y}).$$

Om man sedan tar medelvärdet av friktionsförlusten i varje strömrör får man en uppskattning av friktionsförlusten mellan sektionerna. De beräknade medelvärdena, $\overline{dH}_{1-50}$, återfinns i tabell 2.



Figur 27. Friktionsförlusten i datormodellen beräknades mellan sektionerna $x=1$ och $x=50$.

Eftersom skillnaden i vattenytans nivå i den fysiska modellen var så liten att den inte gick att mäta kan man inte göra någon jämförelse med den. Däremot kan man göra en jämförelse med Mannings tal, eller med friktionskoefficienten, f , i allmänna friktionsformeln. Mannings tal har bestämts experimentellt för stationär likformig strömning [3].

Tabell 1. Empiriska värden på Mannings tal.

Material	Mannings tal $m^{1/3}/s$
Stål	90-110
Slät betong	80-90
Brädddriven betong	65-75

Från datorkörningarna kan man bestämma Mannings tal genom att medelvärdesbilda hydrauliska radien och vattenhastigheten och utnyttja Mannings formel:

$$M^2 = (\underline{u}^2 + \underline{v}^2) * L / (R^{4/3} * \overline{dH})$$

M=Mannings tal

$\underline{u}$ =hastighet i x-led

$\underline{v}$ =hastighet i y-led

L=sträckan mellan sektionerna

R=A/P=hydraulisk radie

A=vattenfylld sektionsarea

P=våta perimetern

$\overline{dH}$ =friktionsförlust

Tabell 2. Resultat från beräkningarna av friktionsförlusten i dator beräkningarna och motsvarande Mannings tal.

Φ	$1*10^{-4}$ [m ² /s]		$1*10^{-5}$ [m ² /s]	
BOTTEN FRIKTION	$\overline{dH}^{1-50}$ [mm]	$M^{1/3}$ [m ^{1/3} /s]	$\overline{dH}^{1-50}$ [mm]	$M^{1/3}$ [m ^{1/3} /s]
-6	0.1033	72	0.1045	72
-3	0.0357	124	0.0372	121
-1	---	---	-0.0091	---

Att den här metoden att beräkna friktionsförluster ur datorberäkningarna är bristfällig framgår ju av resultatet från körningen med bottenfriktionen -1 (tab.3). I det fallet har vi ju ingen friktionsförlust alls. Här kan det dock vara så att datormodellen inte har konvergerat tillräckligt bra. Trycket konvergerade i den siffra i de flesta fall anger 10^{-2} mm i tryckhöjd, och hastigheten i den som anger 10^{-4} m/s.

I den fysiska modellen har vi målad betong. Det material i tabell 1 som mest liknar målad betong är slät betong, som har Mannings tal 80-90. För att få Mannings tal=85 i datormodellen bör man troligen använda bottenfriktionen -5 vid datorberäkningen.

Man kan också göra jämförelsen med allmänna friktionsformeln. Om man löser ut f fås följande uttryck

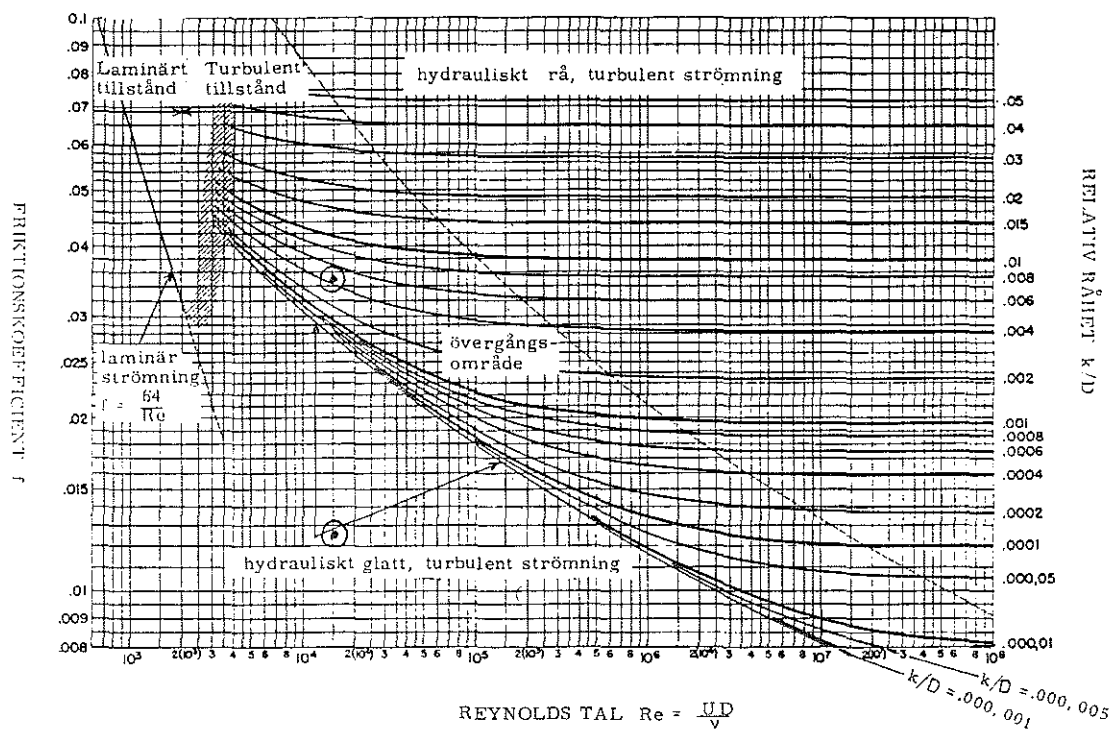
$$f = \frac{dH}{L} \cdot \frac{4R}{2g} \cdot \frac{1}{(\underline{u}^2 + \underline{v}^2)}$$

Med värden på f och Reynolds tal, Re , kan man ur Moodydiagrammet (fig. 28) få den relativa råheten $(k/4R)$ för den sträcka man studerar. Från den relativa råheten kan sedan den ekvivalenta sandråheten, k , bestämmas. Det är en materialkonstant som har bestämts experimentellt för ett stort antal material, t.ex dem i tabell 3 på nästa sida.

Tabell 3. Ekvivalent sandrårhet, k , för olika material [3].

Material	k -värde [mm]
Galv. stål, asfalt. gjutjärn	0.1-1.0
Gjutjärn, asfalterad	0.3-2.0
Betong	1.5
Trä	0.3-1.0

Eftersom $\overline{dH}^{1-50}$ varierar väldigt lite för olika Φ (tab.2) redovisar vi bara resultaten från körningen med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Datorkörningen med bottenfriktionen -6 gav $\overline{dH}^{1-50} = 0.1045 \text{ mm}$ och med allmänna friktionsformeln fås $f = 0.0352$. Reynolds tal för den aktuella sträckan är $1.5 \cdot 10^4$, och Moodydiagrammet ger $k/4R = 0.0045$. Med $R = 0.0777$ fås $k = 1.4 \text{ mm}$. Det är ju jämförbart med ekvivalenta sandrårheten för betong, $k = 1.5 \text{ mm}$. Datorkörningen med bottenfriktionen -3 ger $f = 0.0126$. Det strömningsfallet är dock inte definierat i Moodydiagrammet, så man kan inte få fram något k -värde.



Figur 28. Moodydiagram från [3]. De två fallen med $Re=1.5 \cdot 10^4$, $f=0.0352$ och $f=0.0126$ är markerade i diagrammet.

7. SLUTSATSER

7.1 Strömningsbilder

Vid datorberäkningarna varierades vattnets turbulenta virvelviskositet, Φ , i intervallet $[1 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-5}] \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen i intervallet $[-6, -0.1]$. Vi konstaterade att hastighetsfördelningen en bit uppströms intaget ändras marginellt då parametrarna Φ och bottenfriktion varierar. När Φ minskar och bottenfriktionen ökar bildas två stora, långsamma virvlar på bägge sidor om intaget till kraftverket. Den vänstra virvelns läge och utsträckning förändras lite när parametrarna ändras och den högra går allt längre uppströms med minskande Φ och ökande bottenfriktion. Strömningsbilden för datorkörningen med $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och bottenfriktionen -6 stämmer allra bäst överens med den som mätts upp i den fysiska modellen.

Det finns ett empiriskt uttryck för att beräkna det värde på Φ som är lämpligt att använda vid datorberäkningar av kanalströmning. Uttrycket är $\Phi = C U^* h$, där U^* är friktionshastigheten. Den blir olika för de olika datorberäkningarna när man varierar bottenfriktionen. Här är h typiskt vattendjup. C är en empirisk konstant med värdet 0.05^+ . Med bottenfriktionen -6 fås $\Phi = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och med -3 fås $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Man hamnar alltså nära det värde ($\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) som vi funnit vara det som ger bäst överensstämmelse med den fysiska modellen.

⁺ Rekommenderat av Urban Svensson, Norrköping.

7.2 Friktion

En analys av friktionsförlusten i datormodellen ledde till slutsatsen att friktionsförlusten i strömfåran i princip är oberoende av Φ . Datorberäkningarna med bottenfriktionen -6 svarar mot Mannings tal=72, och med -3 fås $M=123$. Laboratiemätningarna gjordes i en modell av målad betong. Den har nog något högre Mannings tal än slät betong, som har $M=80-90$.

Med allmänna friktionsformeln och Moody-diagrammet fås för körningarna med bottenfriktionen -6 ekvivalenta sandråheten $k=1.4$ mm. Betong har $k=1.5$ mm.

7.3 Tredimensionella fenomen

Datorberäkningarna gjordes i en tvådimensionell modell. När man räknar i två dimensioner vertikalintegreras hastigheten över djupet för att man skall få ett enda värde på hastigheten i varje punkt. Då hastigheten är konstant över djupet fungerar det bra. I den fysiska modellen varierar hastigheter och riktningar strax uppströms kraftverkets intag över djupet, så om man skall göra en noggrann studie av strömningsförhållandena vid intaget bör man nog använda en tredimensionell datormodell.

7.4 Modeller-prototyp

Eftersom vi inte har gjort några mätningar i prototypen är det svårt att dra några slutsatser om hur väl datormodellen och prototypen stämmer överens. I [2] konstateras att medelavvikelsen i uppmätt hastighet i den fysiska modellen och i prototypen låg på 15%, vilket ungefärligen motsvarade mätmetodernas tillförlitlighet. Mätningarna gjordes då det gamla kraftverket kördes, och med de i kap. 4.6 beskrivna pinnarna för att få turbulent strömning i den fysiska modellen. Förutsättningarna var alltså i ganska mycket, olika dem som vi hade vid laboratoriemätningarna. Vi körde ju det nya kraftverket, utan pinnar och med ett större flöde.

I vårt fall beräknades medelavvikelsen mellan uppmätta hastigheter i den fysiska modellen och beräknade hastigheter i datormodellen för de sektioner som ritats i figurerna 18-20. Medelavvikelsen i X-led blev 13%. I Y-led blev den avsevärt högre, 32%, beroende på att hastigheten i Y-led är nära noll i många fall och byter tecken över sektionerna. I absoluta tal är hastigheternas avvikelser i Y-led av samma storleksordning som dem i X-led.

7.5 Vidare studier

Det finns naturligtvis många områden för fördjupade studier av datorberäkningarnas förmåga att efterlikna ett strömningsförlopp.

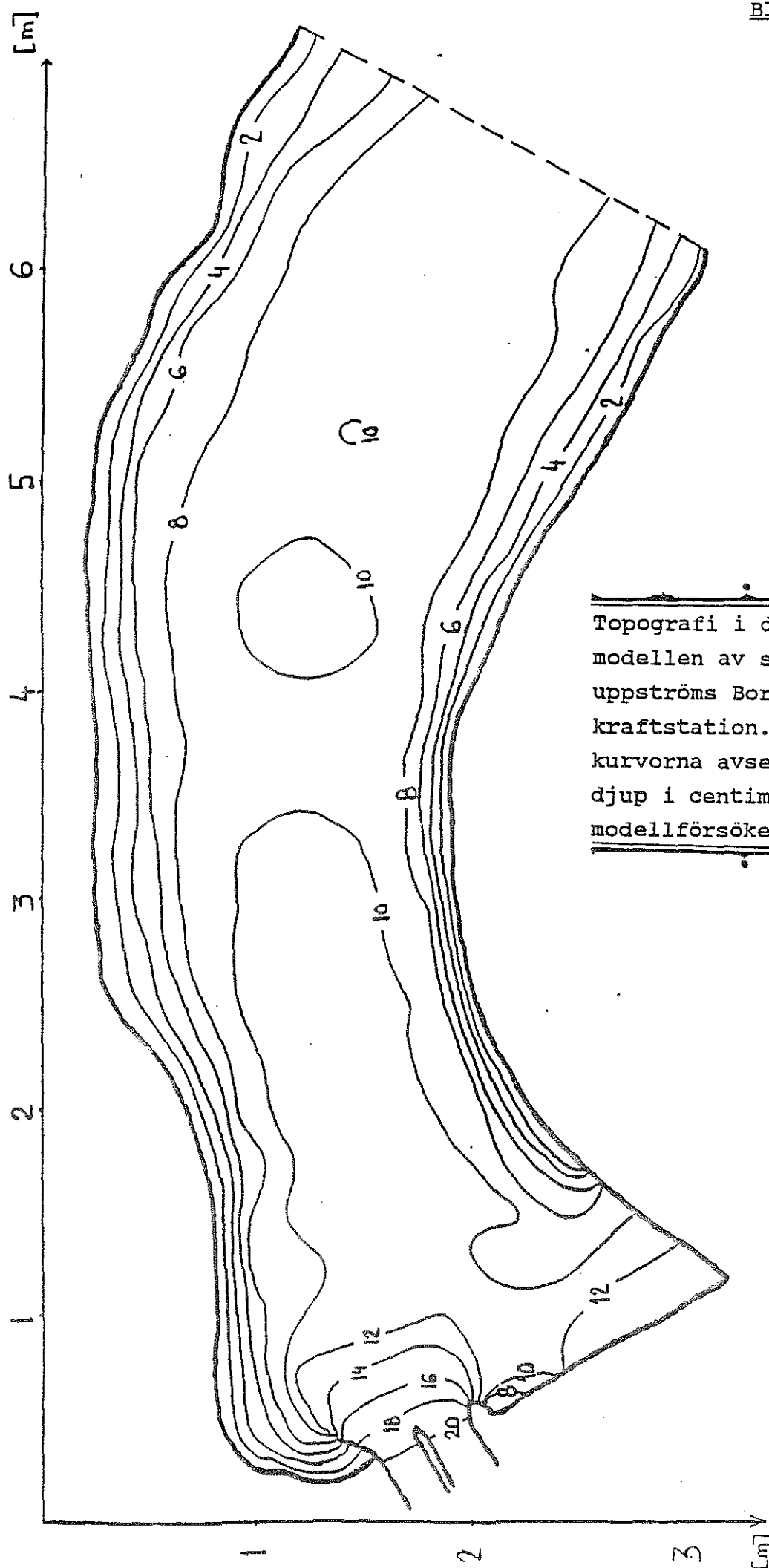
Om man vill studera området strax uppströms kraftverket noggrannt kan man göra beräkningarna med två olika datormodeller. Först gör man en beräkning med en grov cellindelning över hela modellen. Resultaten därifrån används sedan som randvillkor i en modell av området strax uppströms intaget med finare cellindelning.

Det vore också intressant att se hur väl en tredimensionell datormodell skulle fungera. I den fysiska modellen observerade vi flera tredimensionella fenomen, speciellt strax uppströms intaget till kraftverket.

Vid datorberäkningar med PHOENICS behöver man inte göra beräkningarna med konstant ϕ . Turbulenta virvelviskositeten kan i stället uttryckas som en funktion av vattenhastighet och geometri, och på så sätt kan man få en bättre datormodell.

8. REFERENSER

- [1] - Patankar Suhas V, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, U.S.A, upplaga 1, 1980.
- [2] - Frykenberger Lars-Olof, Nikell Lars, Borensbergs kraftstation. En modellstudie av strömningsförhållanden, Göteborg, Examensarbete Nr 1988:2.
- [3] - Cederwall Klas, Larsen Peter, Hydraulik för Väg- och vattenbyggare, Malmö, upplaga 2:2, 1981.
- [4] - Rosten H I, Spalding D B, The PHOENICS Beginner's Guide, Document Revision 04, Software Version 1.4, 1987.
- [5] - Rosten H I, Spalding D B, The PHOENICS Reference Manual, Document Revision 06, Software Version 1.4, 1987.
- [6] - Rosten H I, Spalding D B, Templeman J A, The PHOTON User Guide, Document Revision 03, Software Version 1.4, 1987.



Topografi i den fysiska modellen av strömfåran uppströms Borensbergs kraftstation. Nivåkurvorna avser vattendjup i centimeter vid modellförsöken.

```

TALK=T;RUN( 1, 1);VDU=1
TEXT(BORENSBERG *16/5* FRIKT=-6,ENUT=0.00001,700 sweep )
STEADY=T
NX=98;NY=41;NZ=1
  GR 6
BFC=T;NONORT=T;READCO(BBFC)
  UGEOM=T
    ;LG(2)=T;RG(4)=1./(1000.*9.81)
  GR 7
SOLVE(P1,U1,V1);SOLUTN(P1,Y,Y,Y,N,N,N)
STORE(UCRT,VCRT)
STORE(IMB1)
  GR 8
  TERMS(U1,Y,N,Y,Y,Y,N);TERMS(V1,Y,N,Y,Y,Y,N)
  GR 9
RHO1=1000.;ENUT=.00001
  GR 11
  RESTRT(ALL);FSWEEP=1
  CONPOR(0.0,CELL,92,98,1,12,1,1)
  CONPOR(0.0,CELL,92,98,19,19,1,1)
  CONPOR(0.0,CELL,92,98,27,27,1,1)
  CONPOR(0.0,CELL,97,98,28,41,1,1)
  CONPOR(0.0,SOUTH,1,98,1,1,1,1)
  CONPOR(0.0,NORTH,1,98,41,41,1,1)
  FIINIT(U1)=0.06
  GR 13
  PATCH(INFLO1,WEST,1,1,1,1,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO1,U1,ONLYMS,0.005)
  COVAL(INFLO1,P1,FIXFLU,5.0)
  PATCH(INFLO2,WEST,1,1,2,2,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO2,U1,ONLYMS,0.025)
  COVAL(INFLO2,P1,FIXFLU,25.0)
  PATCH(INFLO3,WEST,1,1,3,3,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO3,U1,ONLYMS,0.035)
  COVAL(INFLO3,P1,FIXFLU,35.0)
  PATCH(INFLO4,WEST,1,1,4,4,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO4,U1,ONLYMS,0.045)
  COVAL(INFLO4,P1,FIXFLU,45.0)
  PATCH(INFLO5,WEST,1,1,5,5,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO5,U1,ONLYMS,0.055)
  COVAL(INFLO5,P1,FIXFLU,55.0)
  PATCH(INFLO6,WEST,1,1,6,10,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO6,U1,ONLYMS,0.062)
  COVAL(INFLO6,P1,FIXFLU,62.0)
  PATCH(INFLO7,WEST,1,1,11,16,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO7,U1,ONLYMS,0.063)
  COVAL(INFLO7,P1,FIXFLU,63.0)
  PATCH(INFLO8,WEST,1,1,17,18,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO8,U1,ONLYMS,0.064)
  COVAL(INFLO8,P1,FIXFLU,64.0)
  PATCH(INFLO9,WEST,1,1,19,21,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO9,U1,ONLYMS,0.065)
  COVAL(INFLO9,P1,FIXFLU,65.0)
  PATCH(INFLO10,WEST,1,1,22,28,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO10,U1,ONLYMS,0.066)
  COVAL(INFLO10,P1,FIXFLU,66.0)
  PATCH(INFLO11,WEST,1,1,29,29,1,1,LSTEP)
  COVAL(INFLO11,U1,ONLYMS,0.067)
  COVAL(INFLO11,P1,FIXFLU,67.0)
  PATCH(INFLO12,WEST,1,1,30,30,1,1,LSTEP)

```

Indatafilen, Q1.

 $\Phi = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Bottenfriktion -6.

```
COVAL(INFLO12,U1,ONLYMS,0.068)
COVAL(INFLO12,P1,FIXFLU,68.0)
PATCH(INFLO13,WEST,1,1,31,33,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO13,U1,ONLYMS,0.069)
COVAL(INFLO13,P1,FIXFLU,69.0)
PATCH(INFLO14,WEST,1,1,34,34,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO14,U1,ONLYMS,0.065)
COVAL(INFLO14,P1,FIXFLU,65.0)
PATCH(INFLO15,WEST,1,1,35,36,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO15,U1,ONLYMS,0.050)
COVAL(INFLO15,P1,FIXFLU,50.0)
PATCH(INFLO16,WEST,1,1,37,37,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO16,U1,ONLYMS,0.040)
COVAL(INFLO16,P1,FIXFLU,40.0)
PATCH(INFLO17,WEST,1,1,38,38,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO17,U1,ONLYMS,0.030)
COVAL(INFLO17,P1,FIXFLU,30.0)
PATCH(INFLO18,WEST,1,1,39,40,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO18,U1,ONLYMS,0.018)
COVAL(INFLO18,P1,FIXFLU,18.0)
PATCH(INFLO19,WEST,1,1,41,41,1,1,1,LSTEP)
COVAL(INFLO19,U1,ONLYMS,0.010)
COVAL(INFLO19,P1,FIXFLU,10.0)
PATCH(OUTFLOW,EAST,NX,NX,13,26,1,1,1,LSTEP)
COVAL(OUTFLOW,P1,1.E10,0.)
    BOTTOM FRIC
PATCH(BOTTOM,HIGH,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
COVAL(BOTTOM,U1,-6.,0.0)
COVAL(BOTTOM,V1,-6.,0.0)
    GR 15
LSWEEP=700;RESREF(P1)=.000001;RESREF(U1)=.001;RESREF(V1)=.001
    GR 16
LITER(P1)=20
    GR 17
RELAX(P1,LINRLX,0.3);RELAX(U1,FALSDT,.2);RELAX(V1,FALSDT,.2)
    GR 19
USEGRD=T
    GR 22
IYMON=18;IXMON=14;TSTSWP=10
    GR 23
ITABL=3;IPLTL=-1;NPLT=10
STOP
```


Cellindelning i datormodellen.

GRIDINDELNING - TEORETISK MODELL

. 4018 volymselement

