



Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

BORENSBERGS KRAFTSTATION

En modellstudie av strömnings-
förhållanden

av

Lars-Olof Frykenberger och Lars Nikell

Examensarbete

Nr 1988:2

Göteborg 1988

Adress: Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

Telefon: 031/72 10 00

FÖRORD

Detta modellförsök har varit vårt examensarbete på vår civilingenjörsutbildning vid Chalmers Tekniska Högskola. Det har varit ett roligt och stimulerande arbete, som gett oss möjlighet att arbeta efter eget huvud och med fria händer vad gäller ideer. Vi har dessutom arbetat med hela processen bakom ett modellförsök. Från inmätning av prototypen, byggande av modellen, mätningar och undersökningar till utvärdering av resultaten.

Vi vill rikta ett varmt tack till de personer som bistått oss i arbetet. Framför allt våra handledare Steffen Häggström och Gösta Lindvall vid Institutionen för Vattenbyggnad, våra uppdragsgivare Ulf Fredberg och Christer Thunström vid ABV-teknik, Mölndal, samt Vattenbyggnads snickare Karl-Oskar Djärv. Dessutom vill vi även tacka Nils Johansson, Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby, för värdefulla råd under arbetets gång, Alf Hedlund från byggplatsen i Borensberg som hjälpt oss med inmätningen av prototypområdet, Leif Malm vid Kordab, Göteborg, som skapade den numeriska terrängmodellen, Bengt Carlsson, Vattenbyggnadslaboratoriet, för hjälp med mätutrustningen samt Ann-Mari Hellgren, som hjälpt oss med utskrift av textmaterial.

Göteborg januari 1988

Lars Nikell

Lars-Olof Frykenberger

INNEHALLSFÖRTECKNING

	Sida
1. SAMMANFATTNING	4
2. INLEDNING	5
3. ORIENTERING	7
4. HYDROLOGISKA DATA	8
5. HISTORIK	9
6. UTBYGGNADSPLANER	12
7. UPPDRAGET	13
8. PROTOTYP OCH MODELL	14
8.1 Modellområdet	14
8.2 Modellregel	16
8.3 Skalar	17
8.4 Uppbyggnad av modellen	18
8.5 Randvillkor	21
8.6 Kalibrering av modellen	22
9. MÄTUTRUSTNING	24
9.1 Prototyp	24
9.2 Modell	24
10. UNDERSÖKNINGAR I MODELLEN	26
10.1 Schaktlutning	26
10.2 Inverkan av stenkista	26
10.3 Överskottstappning	26
10.4 Stödmursriktning	30
10.5 Svallningstendenser vid snabbstopp	30

11.	RESULTAT	31
11.1	Strömförhållanden	31
11.2	Schaktlutning	33
11.3	Inverkan av stenkista	40
11.4	Överskottstappning	40
11.5	Stödmursriktning	41
11.6	Svallningstendenser vid snabbstopp	41
12.	TILLFÖRLITLIGHET	42
13.	FÖRSLAG TILL UTFORMNING	43
14.	REFERENSER OCH LITTERATUR	44

BILAGOR B1 - B9

Allmänt

Bilaga 1	Orientering
Bilaga 2	Modellområdets orientering
Bilaga 3	Modellområdet

Kraftverket

Bilaga 4	Situationsplan
Bilaga 5	Plan över intag och snäcka
Bilaga 6	Längdsektion
Bilaga 7	Plan över generatorhall

Kalibrering

Bilaga 8	Uppmätta vattenhastigheter i prototyp och modell
----------	--

Svallning

Bilaga 9	Överslagsberäkning av första uppsvallande våg vid momentant stopp.
----------	--

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete har utförts vid Institutionen för Vattenbyggnad vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet innefattar ett modellförsök på Borensbergs nya kraftstation i Motala Ström. Modellen omfattar området från kraftstationen och 300 meter uppströms.

Modellförsöket har utförts enligt Froudes modellregel i skala 1:40.

Avsikten med försöket har varit dels att klarlägga blivande strömförhållanden, och dels att studera och finna lämpliga lösningar på olika detaljer. Vi har undersökt den mest fördelaktiga lutningen på schakten in mot intagen, inverkan av den i strömfåran befintliga stenkistan, eventuella svallningstendenser vid snabbstopp av kraftstationen samt lämplig riktning på den till intaget anslutande stödmuren.

2. INLEDNING

Vattenkraften står idag för cirka 56 % av vårt elbehov, eller 17 % av energibehovet. 67 TWh produceras årligen i våra vattendrag (1984).

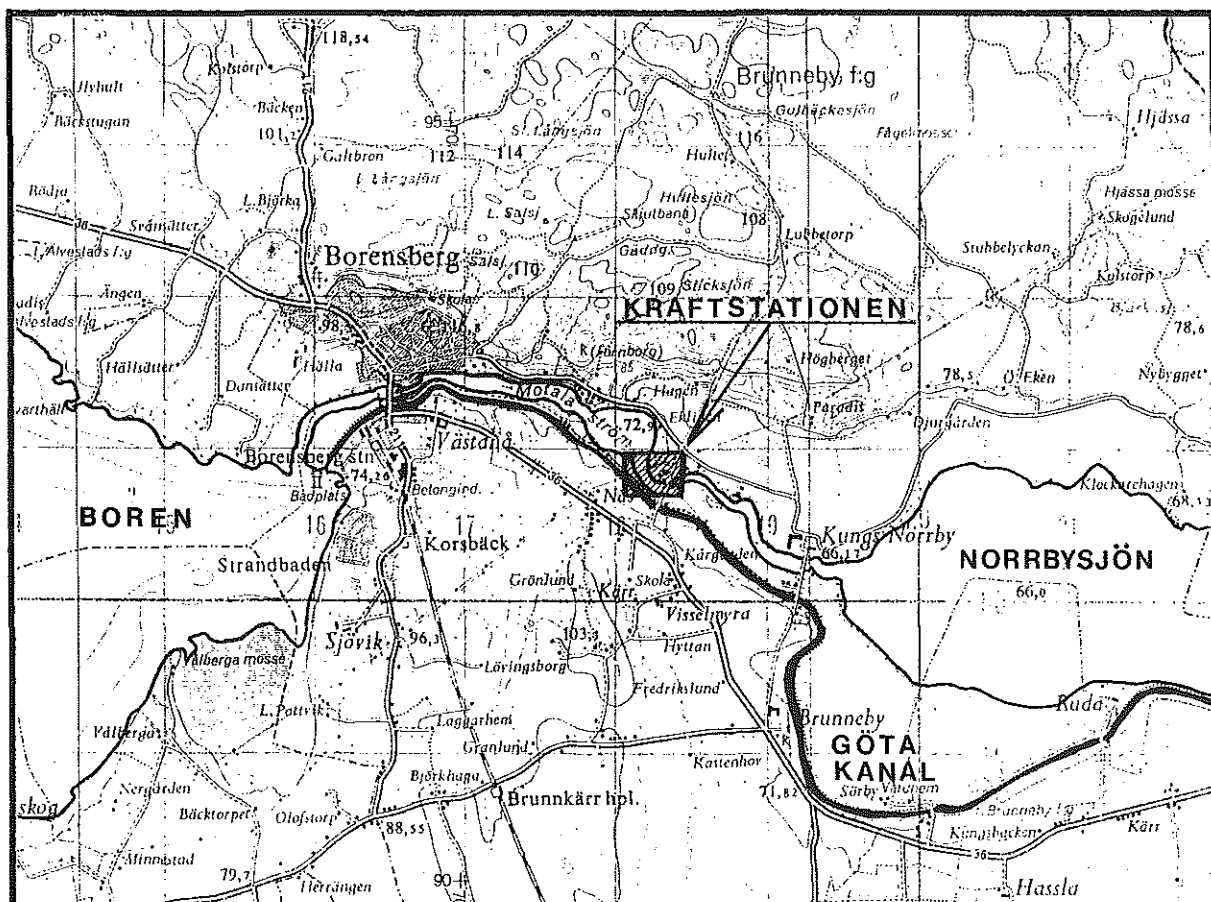
Utbyggnaden av de stora älvarna är i stort sett färdig samtidigt som de äldre kraftstationerna i de mindre vattendragen börjar närma sig pensionsåldern. Dessa kraftstationer är idag nästan sekelgamla och har ofta många men små turbiner. De är dessutom i många fall inte dimensionerade för dagens moderna kraftproduktion med olika kraftpriser under dygnets timmar och mellan veckans dagar. Denna prisdifferens leder till en önskan att kunna tappa stora flöden under högpristider, för att sedan stänga stationen eller kraftigt minska tappningen under övrig tid. Regleringen sker ofta på vecko-basis. Detta leder också till att de olika kraftverken i samma vattendrag måste samverka med varandra för att på ett optimalt sätt utnyttja vattenmängderna.

Det är bland annat dessa faktorer som gör att intresset för de små och medelstora kraftverken har ökat och det byggs idag på allt fler ställen nya kraftverk, med större effekt och färre turbiner, som ersättning för de äldre stationerna.

En sådan kraftstation, som nu skall ersättas med en ny, är Borensbergs kraftstation (figur 1). Den nya stationens placering är inte helt idealisk, beroende på att den måste byggas vid sidan av den befintliga kraftstationen (figur 2). Därmed fanns farhågor om att strömningen kunde bli ogynnsam till intagen. Vi har av denna anledning blivit ombedda att i modell studera de blivande förhållandena. Vi har även tittat på olika alternativa lösningar.

3. ORIENTERING

Borensbergs kraftstation är belägen i Motala Ström cirka tre kilometer nedströms sjön Boren, i Östergötland (figur 3).



Figur 3. Modellområdets orientering

Motala Ström avvattnar Vättern och rinner sedan genom sjöarna Boren, Norrby, Roxen och Glan för att via Bråviken mynna i Östersjön. Parallellt med strömmen löper Göta Kanal (bilaga 1 - 2). Den modell som har byggts för att studera strömförhållandena är i skala 1:40 och omfattar kraftverket och cirka 300 meter uppströms. Modellområdets omfattning framgår av bilaga 3.

4. HYDROLOGISKA DATA

Motala Ströms avrinningsområde är 15 500 km² stort och innefattar i princip hela Östergötland (10 000 km²), samt via Vättern delar av Småland och Västergötland. Fallhöjden mellan Vättern och Östersjön är 88,5 meter varav 7 meter utnyttjas i Borensberg.

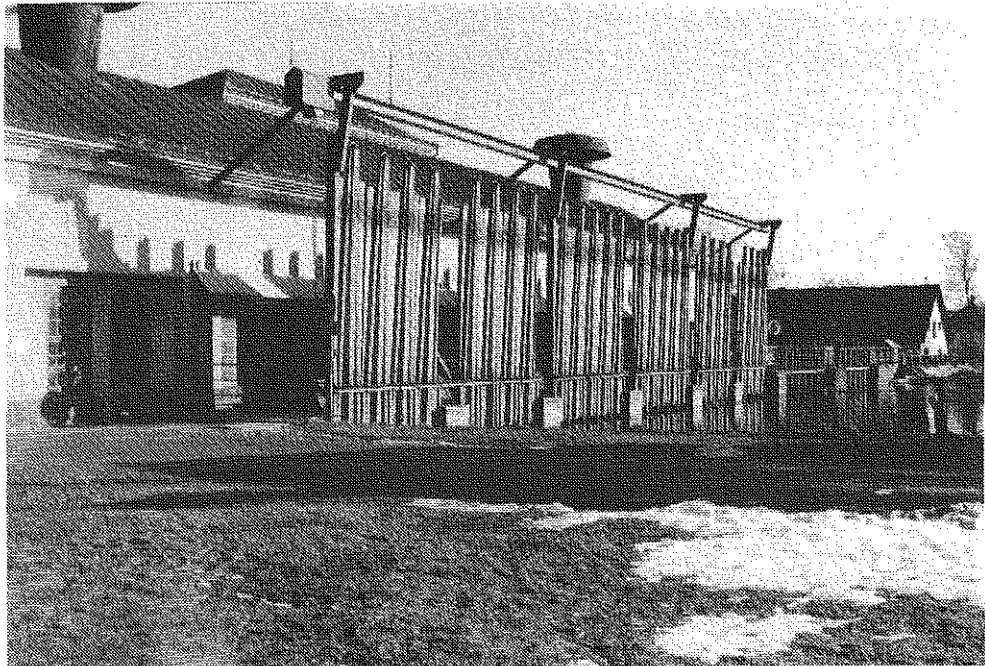
Den del av strömmen som ligger uppströms Borensbergs kraftstation har som enda egentliga tillflöde Vätterns utlopp. I och med att Vättern utgör ett såpass stort magasin (2 miljarder m³), kan tappningen hållas tämligen konstant under året. Vätterns medelavrinning är 42 m³/s och dess yta är 1912 km².

Mellan Vättern och kraftstationen i Borensberg ligger sjön Boren med en areal av 28 km². Dämningsgränsen vid kraftstationen är fastställd till +73,410 och sänkningsgränsen till +73,100 vilket ger en regleringshöjd på 31 cm. Detta ger Boren ett magasin på nära 9 miljoner m³ (bilaga 2)

Dagens utbyggnadsvattenföring på 54 m³/s kommer att ökas till 92 m³/s. Detta innebär att vattenhastigheten i strömfåran kommer att öka från 20-40 cm/s till 50-85 cm/s.

5. HISTORIK

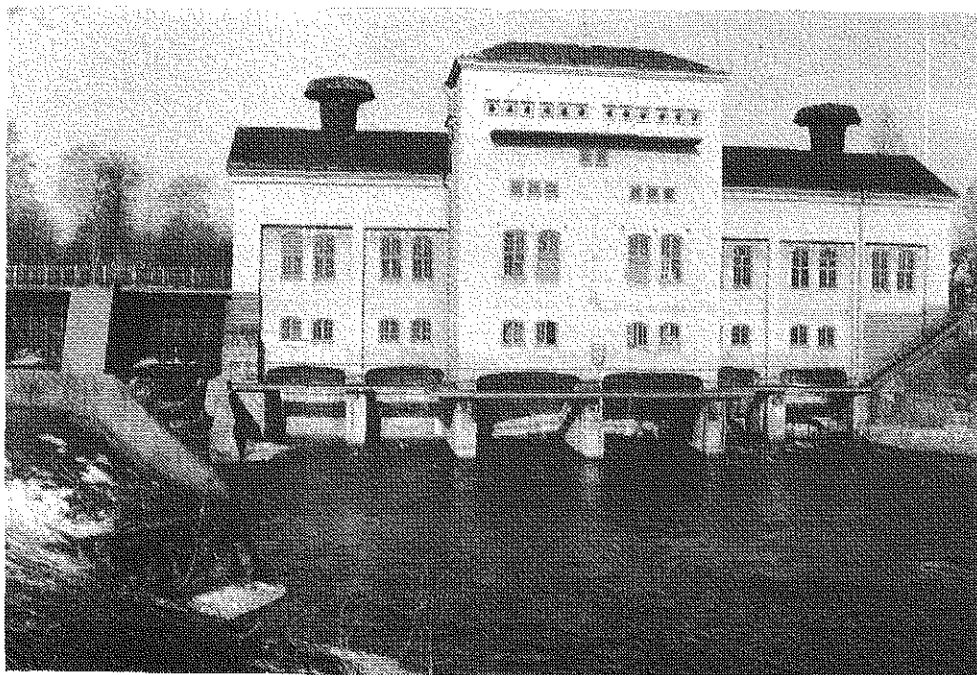
Motala Ström har fungerat som kraftkälla i flera hundra år. Vid Näs, där Borensbergs kraftstation i dag byggs, har det funnits flera olika kvarnar som fått sin mekaniska energi från vattenhjul i strömmen. Kvarnen från 1775 finns fortfarande kvar, fast driften sedan länge naturligtvis upphört.



Figur 4. Gamla kraftstationen sedd från uppströmssidan

År 1899 började planerna på en elektrisk kraftstation ta form i och med att ett konsortium köpte Näs kvarnar med tillhörande fallrättigheter. Ur konsortiet bildades 1903 Motala Ströms Kraft AB som tog kraftstationen i drift år 1904 (figur 4 - 5). För att säkra sina elleveranser hade man tecknat kontrakt med bland andra Vadstena stad och gruvföretaget Vielle Montagne i Zinkgruvan i södra Närke.

Stationen hade vid starten fyra aggregat men var förberedd för ytterligare två stycken. I takt med en ökad efterfrågan på elektricitet och genom fortsatt utbyggnad av distributionsområdet började stationen närma sig produktionstaket. På 1930-talet fullbordades därför stationen med de två återstående aggregaten och fick därmed sin nuvarande effekt på 2,5 MW (figur 6). Under detta årtionde bytte också stationen ägare genom att Vattenfall köpte Motala Ströms Kraft AB.

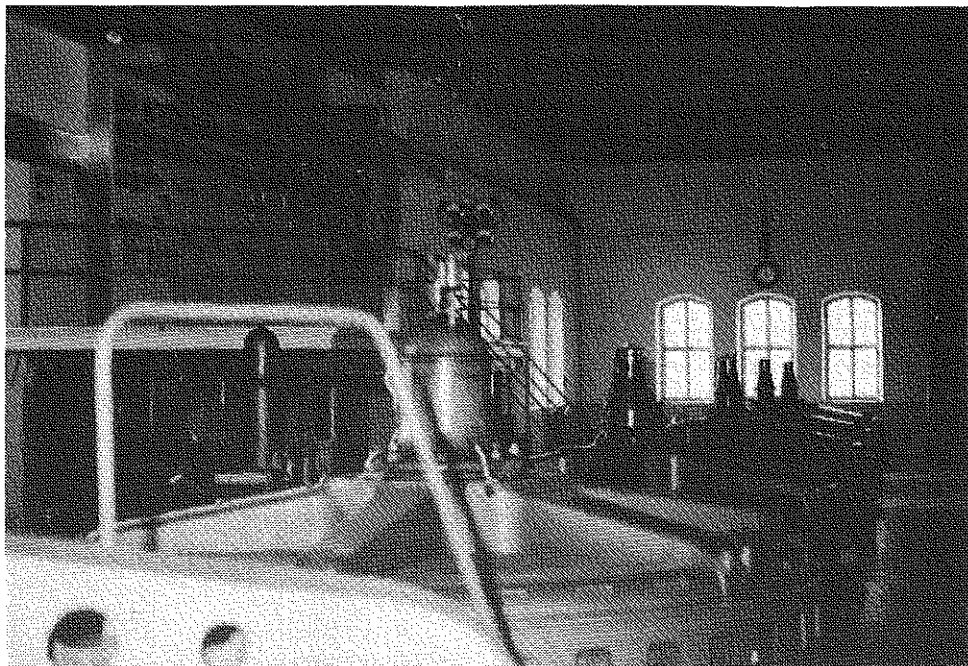


Figur 5. Gamla kraftstationen sedd från nedströmssidan

Stationen har kvar sina ursprungliga turbiner och generatorer, även om de sistnämnda är omlindade.

Som kuriosa kan nämnas att det var från Borensberg kraftstation som strömmen (22 kW) till Sveriges första elektrifierade järnväg kom. Det var linjen Borensberg-Klockrike, som blev elektrifierad år 1907. Leveransen var på 10 000 volt och 25 Hz. Banan hade elektrisk drift fram till år 1956 då SJ på grund av det udda volt- och periodantalet övergick till dieseldrift.

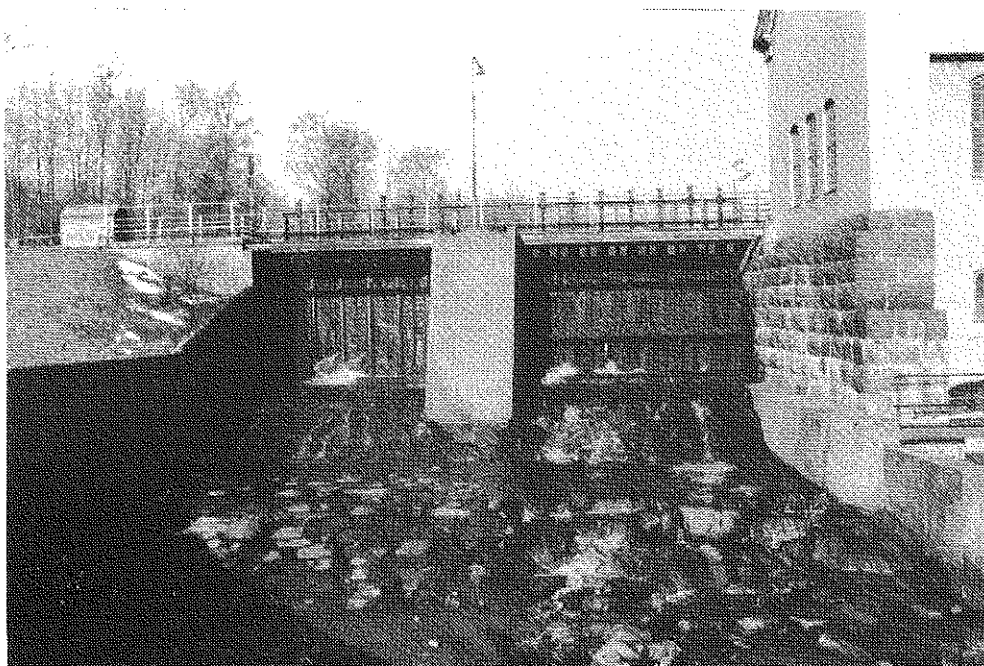
I augusti 1986 tog Vattenfall ett principbeslut om att bygga en ny och större station. I maj 1987 påbörjades byggandet med ABV som totalentreprenör och stationen skall tas i kommersiell drift den 1 december 1988.



Figur 6. Interiör från gamla kraftstationen

6. UTBYGGNADSPLANER

Den nya kraftstationen med sina två aggregat kommer, med en utbyggnadsvattenföring på $92 \text{ m}^3/\text{s}$ och en fallhöjd av 7 m, att ge en effekt av drygt 5 MW. Energiproduktionen kommer då årligen att uppgå till 18 GWh. Vattenföringen har valts till $92 \text{ m}^3/\text{s}$ för att stationen bättre skall samverka med övriga anläggningar i Motala Ström. Utöver kraftstationen skall även ett nytt utskov, med två nya luckor, byggas (figur 7). Utformningen av den nya anläggningen framgår av bilaga 4 - 7.



Figur 7. De befintliga utskoven. Utskovet till höger på bilden skall ersättas med ett nytt, som har två luckor, medan det vänstra skall behållas som reservutskov.

Kraftverket kommer att drivas obemannat och vara fjärrstyrt från Vattenfalls driftcentral i Motala. När anläggningen är färdigställd och tagen i bruk, kommer den gamla att stoppas och intagen att gjutas igen. Denna kommer därefter att fungera som museum över ett stycke svensk industrihistoria.

7. UPPDRAGET

Eftersom den nya kraftstationen skall placeras i andra änden av den befintliga dammkroppen, och dessutom ges en nästan fördubblad vattenföring, ville ABV-teknik få en kontroll utförd av att acceptabla strömförhållanden kommer att uppnås (figur 8). Dvs att inströmningsriktningarna inte blir alltför sneda och att inga tendenser till virvlar finns. Man ville även få en lämplig bottenlutning in mot den nya kraftstationen utredd.

Det fanns dessutom önskemål om att få eventuella svallningsproblem vid snabbstopp upptäckta, samt att få veta hur strömningsförhållandena förändras vid olika köralternativ, med eller utan tappning genom utskoven.

Utformningen av, och läget för, stationen var redan bestämd. Undersökningarna och eventuella åtgärder skulle därför främst omfatta sträckan uppströms själva stationen, samt vid intagsdelen.



Figur 8. Vy över dammen. Det är i den närmaste delen av dammen som den nya kraftstationen byggs.

8. PROTOTYP OCH MODELL

8.1 Modellområdet

Den reproducerade strömfåran karakteriseras av en relativt regelbunden kanalform. Den vänstra stranden är dock något brantare än den högra. Utseendet framgår av bilaga 3. Fåran har en svagt böjd form. Dagens utbyggnadsvattenföring på $54 \text{ m}^3/\text{s}$ kommer att ökas till $92 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta innebär att vattenhastigheten i strömfåran kommer att öka från 20-40 cm/s till 40-85 cm/s.

Det avbildade områdets längd är ungefär 300 m, och dess bredd varierar mellan 60 och 100 m (figur 9).

Den övre modellgränsen har förlagts till en position, där man i prototypen har en övergång från en mer sjöliknande sektion till kanalform. Uppströms denna gräns råder låga hastigheter, med ganska jämn fördelning över tvärsnittet, vilket lätt kan efterliknas i modellen.

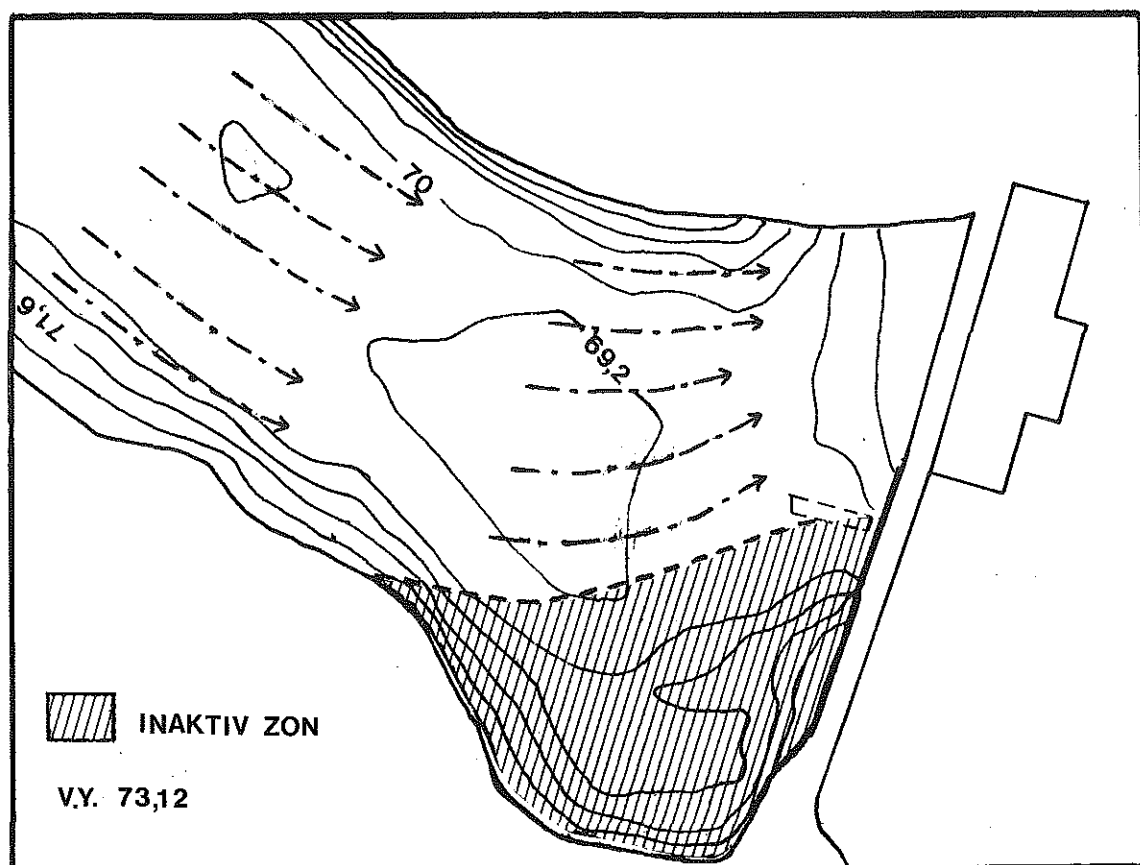


Figur 9. Modellområdet sett från dammen. Övre modellgränsen har markerats med den streckade linjen.

Den nedre gränsen har lagts i ett snitt omedelbart framför turbinerna, vilka simuleras med ventiler, för att utflödet lätt ska kunna regleras.

Vattenhastigheterna i strömfåran mättes i fält vid en vattenföring på $50 \text{ m}^3/\text{s}$ genom det gamla kraftverket. Den varierade då mellan 20 och 40 cm/s, med något högre värden i innerkant. (Se kalibrering av modellen.)

En översiktlig strömbild för den gamla kraftstationen visas i figur 10.



Figur 10. Översikt av strömriktningar in mot den gamla kraftstationen.

8.2 Modellregel

Modellen är byggd i skala 1:40 och försöken utförs i enlighet med Froudes modellregel. Dvs Froudes tal skall vara lika i prototyp och modell. Froudes tal beskriver förhållandet mellan tröghetskrafterna och gravitationskraften [1].

För att erhålla full överensstämmelse mellan prototyp och modell, borde även Reynolds tal, som beskriver förhållandet mellan tröghetskrafterna och den viskösa tangentialkraften, vara lika. Detta är dock omöjligt att uppnå, eftersom man då tvingas använda en vätska, med annan viskositet än vatten. Allmänt anses dock att man kan bortse från avvikelser i viskositet, och därmed också från Reynolds tal, om detta i modellen överstiger ett kritiskt värde, vilket anses vara ungefär 6×10^3 [2].

$$Fr = \frac{U}{(g x y_m)^{1/2}}$$

U - vattnets medelhastighet
g - tyngdaccelerationen
y_m - hydrauliskt medeldjup = A/sektionsbredd

$$Re = \frac{U x 4 x A / p}{v}$$

A - sektionsarea
p - våta perimetern
v - kinematisk viskositet

$$Re_p \approx 5 \times 10^6$$

$$Re_m \approx 20 \times 10^3$$

$$Re_{krit} \approx 6 \times 10^3$$

Teoretiskt skall modellen då uppvisa dynamisk såväl som kinematisk och geometrisk likformighet med prototypen, vilket innebär:

- + Dynamisk likformighet - förhållandet mellan verkande krafter är lika.
- + Kinematisk likformighet - förhållandet mellan hastigheter i alla motsvarande punkter är lika.
- + Geometrisk likformighet - förhållandet mellan alla motsvarande längder, i prototyp och modell är lika.

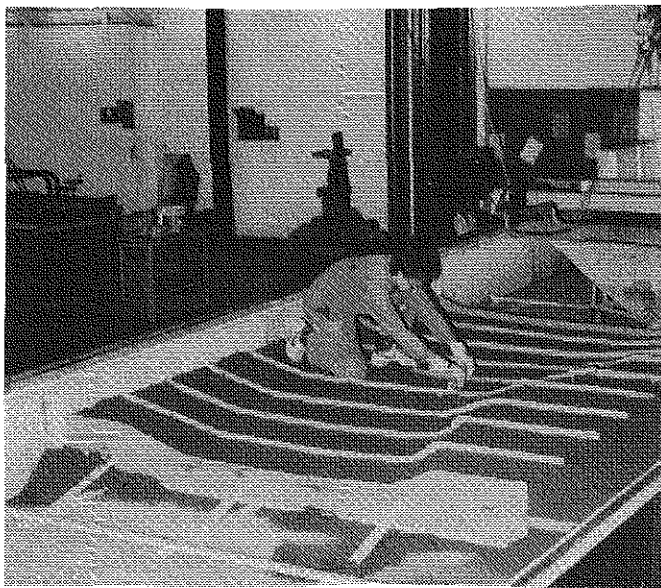
8.3 Skalor

På vattenbyggnadslaboratoriet på Chalmers Tekniska Högskola finns en 11 m lång och 3 m bred ränna. För att få plats med modellen i denna valde vi modellskalan 1:40. Denna skala, tillsammans med Froudes modellregel, ger följande förhållande [3]:

längd	1 : 40		
tid	1 : $40^{1/2}$	≈	1:6,3
hastighet	1 : $40^{1/2}$	≈	1:6,3
vattenföring	1 : $40^{5/2}$	≈	1:10 000

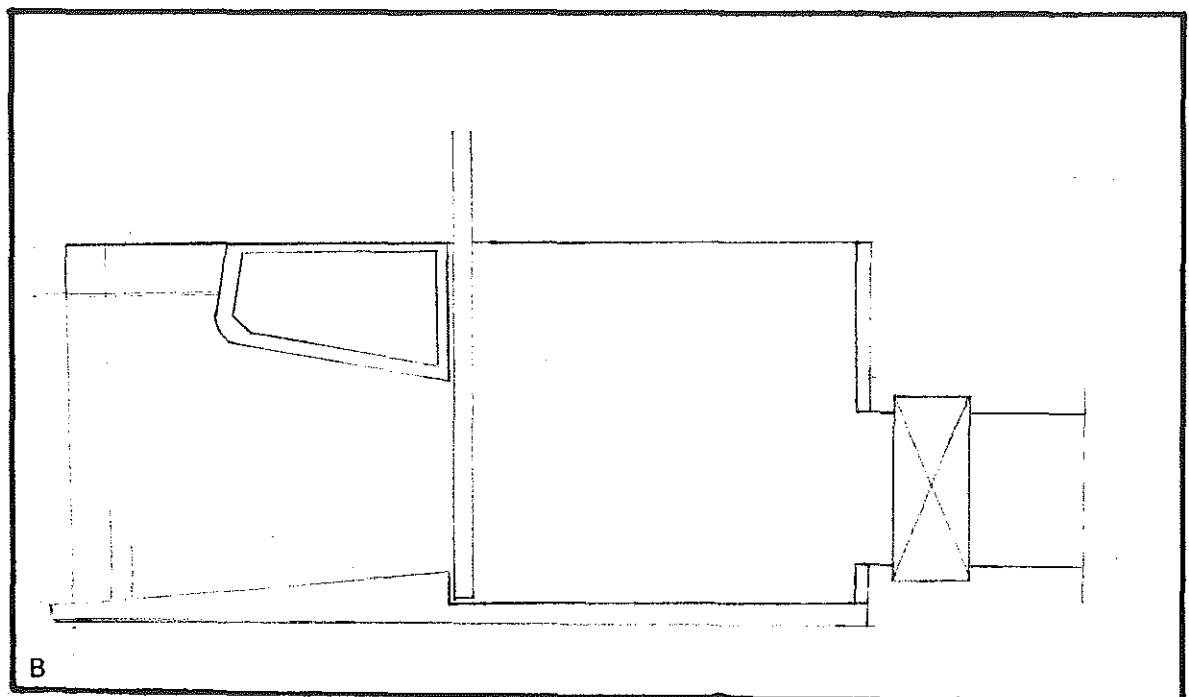
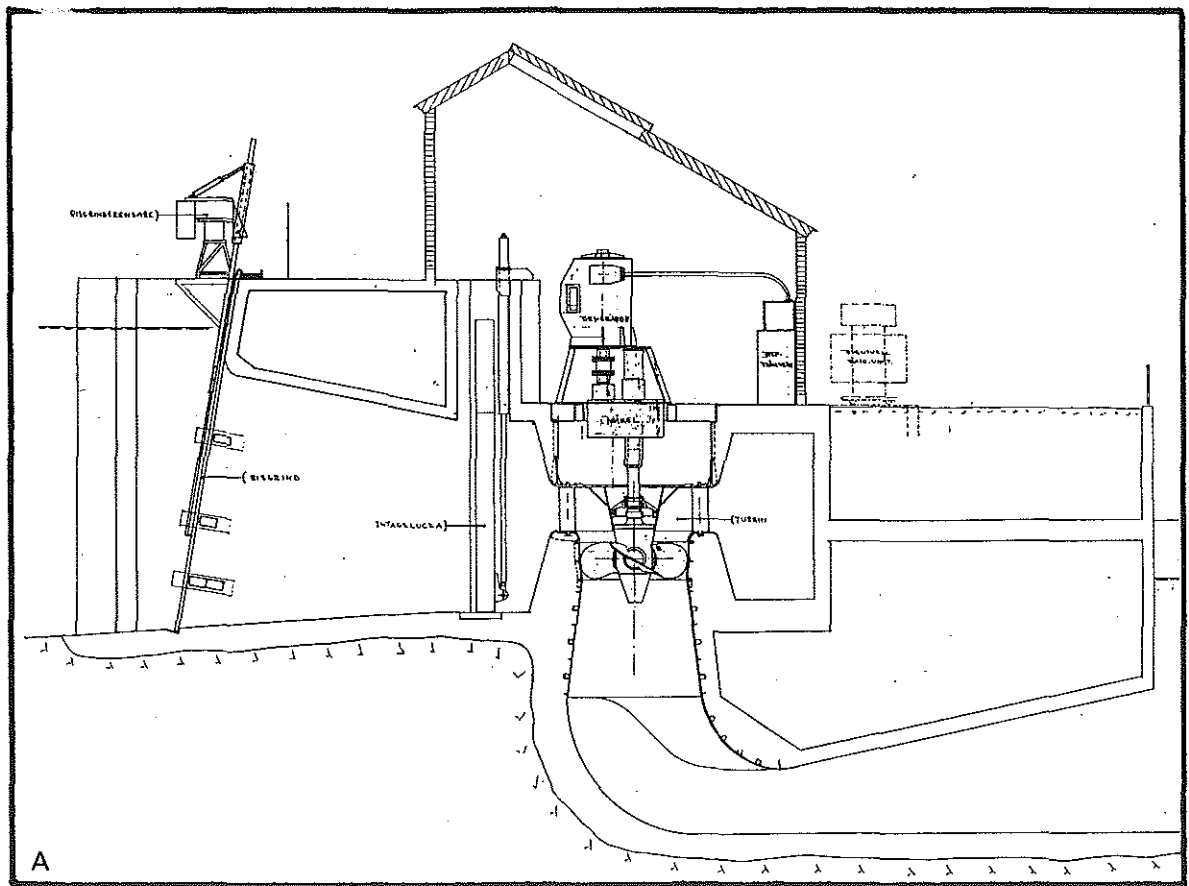
8.4 Uppbyggnad av modellen

Modellområdets geometri och strömfårans djupförhållande mätte vi upp i prototypen genom avvägning. Med hjälp av dessa mätningar, skapades sedan en numerisk terrängmodell. Ur denna valde vi ett antal tvärsektioner, efter vilka byggmallar har tillverkats. Bottengeometrin mellan dessa mallar formades med väggrus. Ovanpå detta gjöts ett 3 cm tjockt betongskikt (figur 11).



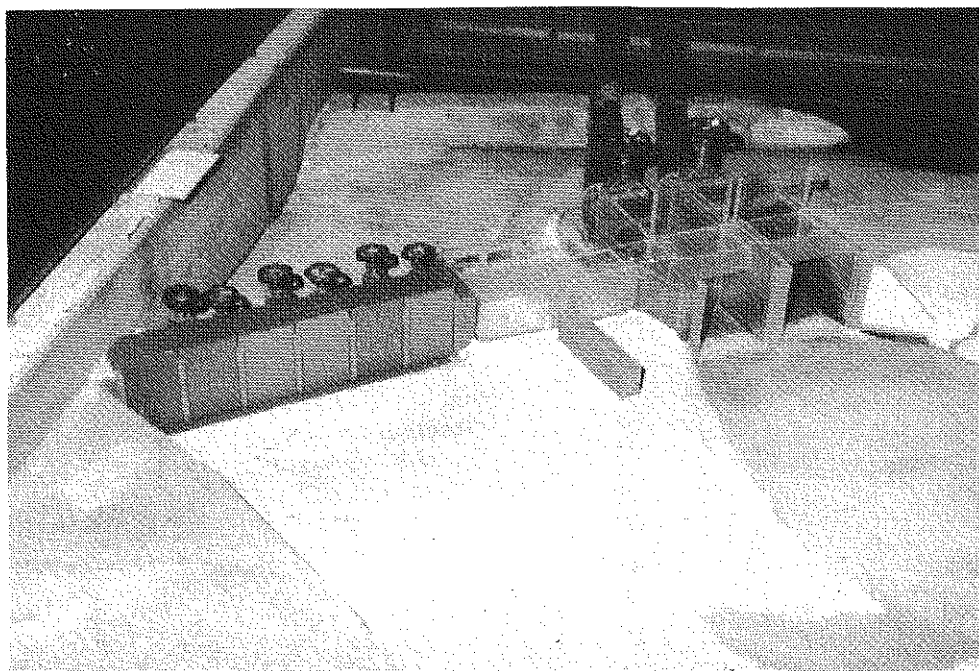
Figur 11. Bottengeometrin formas med väggrus mellan masonite-mallar.

De båda kraftstationerna och utskoven har i modellen byggts av PVC-plast och plexiglas. Den nya stationen är uppströms avstängningsluckorna geometriskt identisk med prototypen. Nedströms luckorna har stationen utförts som en ren förlängning av sektionen vid luckorna, varefter två ventiler har fått simulera turbinerna (figur 12).



Figur 12. Längdsektion genom
a: Prototypkraftverket
b: Modellkraftverket

Det nya utskovet såväl som det gamla är också geometriskt korrekt. Den gamla kraftstationen har enbart använts för att kalibrera modellen och därför har vi nöjt oss med att endast göra dess intag korrekta. Resten av stationen har anpassats till utrymmet i rännan. (vid kalibreringen är inte den lokala strömbilden av intresse.) Även den gamla stationens turbiner är simulerade med ventiler (figur 13).



Figur 13. Modellkraftverken och mellanliggande utskovsparti. Observera stenkistan framför utskovens mittpelare.

Eftersom flera schakter, med olika bottenlutning, framför det nya kraftverket skulle provas, byggdes de olika alternativen i glasfiberformar som passade i modellen. Detta gjordes för att vi lättare skulle kunna skifta mellan olika schaktlutningar.

8.5 Randvillkor

De randvillkor som måste uppfyllas i modellen är:

- + Korrekt hastighetsfördelning vid den övre modellgränsen.
- + Rätt in- och utflöde.
- + Korrekt nivå av vattenytan i modellgränsen.

Med hjälp av en lugningsanordning, och placeringen av den övre modellgränsen, uppfylls det viktiga första randvillkoret, med rätt hastighetsfördelning som följd.

När rätt inflöde injusterats, regleras vattenytans nivå enkelt med hjälp av utströmningsventilerna i det nedre gränssnittet. När konstant nivå erhålls, överensstämmer även utflödet med inflödet.

8.6 Kalibrering av modellen

Förutom att randvillkoret, korrekt vattenyta vid modellgränsen, skall uppfyllas, måste vattenytan ligga på rätt nivå i hela modellen. Det vill säga energiförlusten längs vattendraget måste simuleras korrekt. Dessutom skall hastighetsfördelningen vara riktig utefter hela modellen, samt lika strömningstillstånd råda. För att åstadkomma detta måste man normalt kalibrera modellen mot i fält uppmätta värden.

I vårt fall är den avbildade sträckan så kort att några nivåskillnader ej går att uppmäta, (vare sig i prototyp eller modell). Vi har därför bara jämfört hastighetsfördelningen. I fält mättes hastigheten i 10 punkter fördelade på 3 sektioner. Hastigheten mättes i strömriktningen på flera olika djup i varje punkt. Motsvarande mätningar i modellen visade att överensstämmelsen var godtagbar. Medelavvikelsen var cirka 15 %, vilket är av samma storleksordning som mätmetodernas felmarginaler. Då det dessutom inte fanns någon tendens till regelbundenhet i felen, fastslog vi att någon modifiering av modellen ej behövde göras (bilaga 8).

Att lika strömningstillstånd inte rådde, var däremot något som vi måste ta hänsyn till. På grund av låga vattenhastigheter i modellen, 3-6 cm/s, samt att viskositeten inte kunnat skalats ned, fanns tendenser till laminär strömning. I ett vattendrag som Motala Ström råder dock turbulent strömning. I verkligheten skapas denna turbulens av ojämnheter i, och friktion mot botten. I modellsammanhang räcker inte alltid detta, utan störning av vattnet måste ofta läggas till på konstgjord väg, med t.ex. pinnar eller tråklossar. Därför försågs modellens inströmningssektion med ett stort antal tunna stående träpinnar, vars uppgift är att säkerställa turbulent inströmning. Denna turbulens underhålls sedan i strömfåran, av ett mindre antal jämnt fördelade pinnar (figur 14). Dessa påverkar inte den storskaliga hastighetsfördelningen nämnvärt, men ger däremot större effekt i sin närmaste omgivning. Dvs en turbulent strömbild skapas utan att hastighetsfördelningen i stort ändras. För att inte störa inströmningen till själva kraftstationen har den sista biten av botten lämnats fri från pinnar. I denna del är dock hastigheten så pass hög, att turbulens ändå uppträder.



Figur 14. Turbulensskapande pinnar. I den övre modellgränsen har ett stort antal pinnar fästs, för att säkerställa en turbulent strömning in i modellen. I övriga delar av modellen har pinnarna satts glesare, då de bara skall underhålla den skapade turbulensen.

9. MATUTRUSTNING

För att kunna studera, mäta och bestämma olika storheter och förlopp i prototypen, såväl som i modellen, har olika instrument och metoder använts.

9.1 Prototyp

Vattenhastigheter har i prototypen mätts med en s k fältflygel, vilket är en propeller monterad på en lång stång, som för varje varv ger en elektrisk puls vilken registreras av en pulsräknare. Mätningen pågår under ett par minuter och via en kalibreringskurva fås sedan vattenhastigheten.

Flödet har bestämts via Vattenfalls körjournal för den tid då vi gjorde hastighetsmätningarna.

Vattenytans nivå lästes av på en pegel vid kraftstationen. Vattenytan varierar någon eller några decimeter under dygnet, så ett medelvärde togs under den tid mätningarna pågick.

9.2 Modell

I modellen har en mikroflygel använts för mätning av vattenhastigheter. Denna fungerar på ungefär samma sätt som fältflygeln. Skillnaden är att den är så känslig, att den måste kalibreras både före och efter varje mättag. Detta har gjorts i en bassäng med stillastående vatten och en rörlig vagn.

Flödet in i modellen har reglerats med en ventil och mätts med en flödesmätare för rörmätningar. Då laboratoriets interna vattensystem alltid har samma trycknivå, kan ett konstant flöde erhållas med endast en ordinär ventil. Flödet ut ur modellen är lika stort som flödet in om vattenytan är konstant. För att ställa in ventiler på kraftverket så att de avbördar lika stort flöde vardera, har tiden som åtgår för att fylla en behållare på 91 liter mätts för respektive ventil.

Vattenytans nivå har bestämts med en spetsmätare.

Strömriktningar och eventuella tendenser till virvelbildningar har i modellen studerats med hjälp av färgutsläpp. Färgämnesstudier är mycket användbara, eftersom man relativt enkelt kan följa vattenströmmarnas rörelser och variationer. För att kunna gå tillbaka och studera intressanta problem, efter det att utformningen av kanalen förändrats, har dessa undersökningar video-filmats.

10 UNDERSÖKNINGAR I MODELLEN

10.1 Schaktlutning

För att bestämma brantaste godtagbara släntlutning in mot intaget byggdes tre olika lutningar i ett första skede. Dessa lutningar var 1:10, 1:7 och 1:5. Med alla tre lutningarna gjordes hastighetsmätningar och observationer av strömförhållandena med hjälp av färgutsläpp (figur 15).

Då dessa undersökningar var klara gjorde ABV en revidering av intagets botten, vilken innebar att botten höjdes med 75 cm. Anledningen var att man ville erhålla minsta möjliga bergschakt respektive schakt under vatten för att minska anläggningskostnaderna. Denna ändring medförde nya undersökningar av schakterna, dock bara för lutningarna 1:7 och 1:5 (figur 16). Ovan nämnda undersökningar har delvis dokumenterats genom videofilmning.

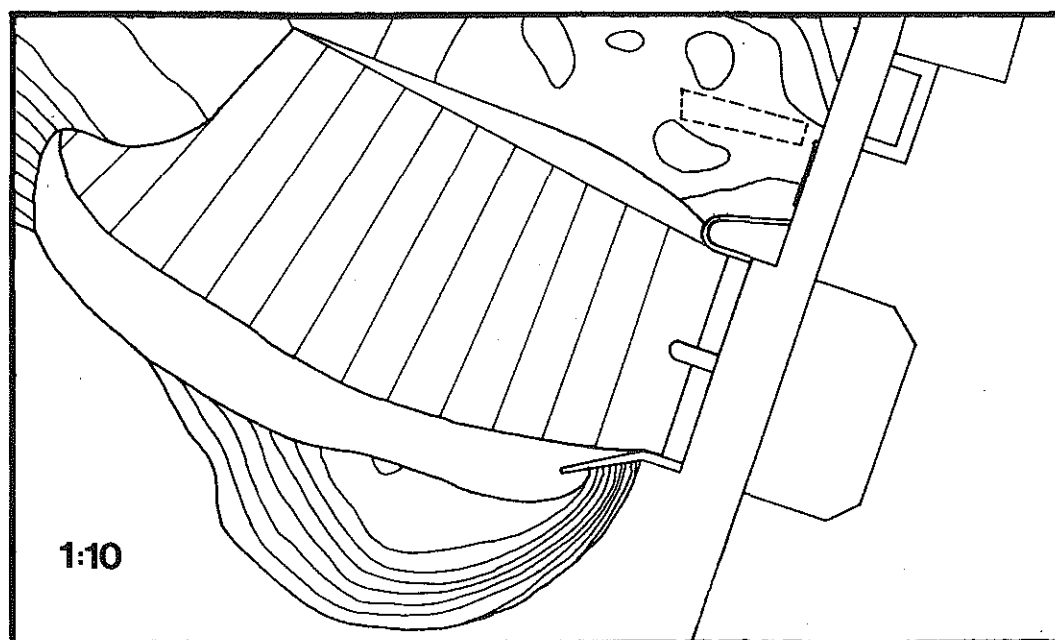
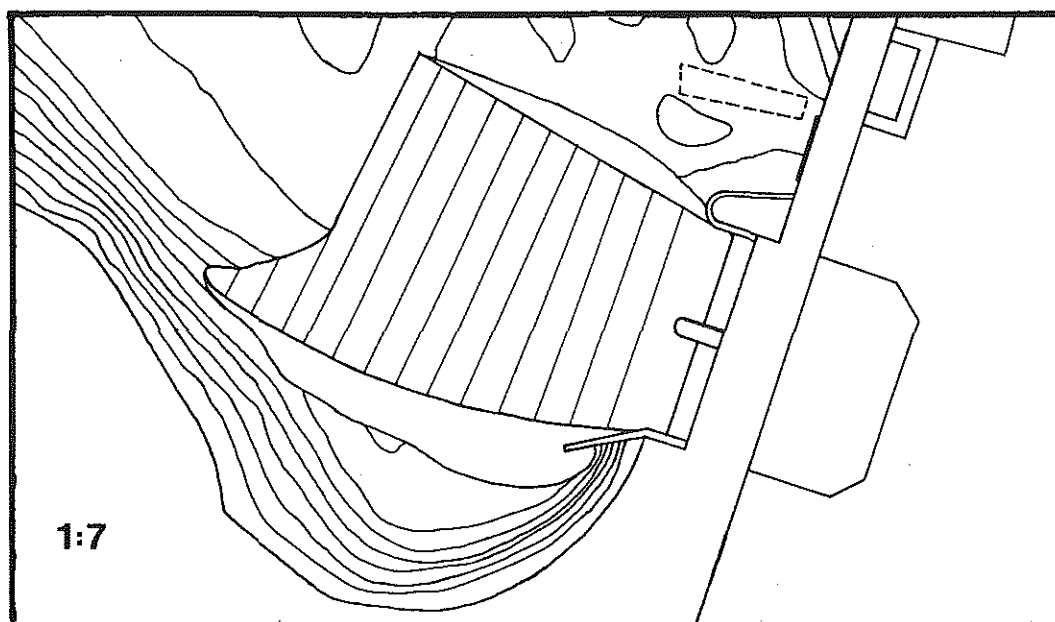
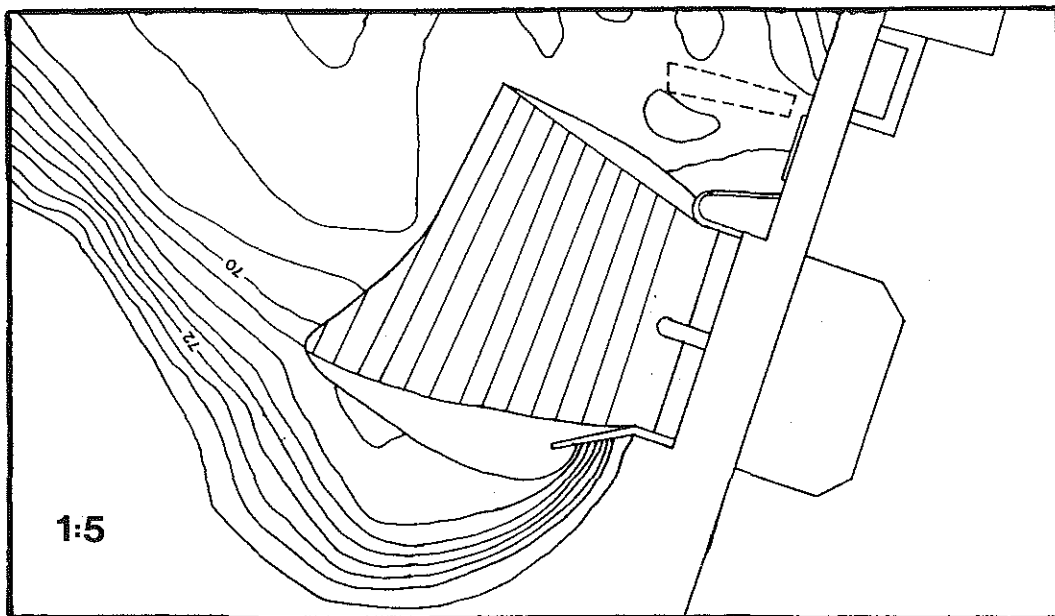
10.2 Inverkan av stenkista

För att bestämma den befintliga stenkistans inverkan på strömningen samt vad en eventuell om- och tillbyggnad av denna hade för effekt, byggdes fem olika stenkistor, samt en speciell styrvinge att placera framför stenkistan (figur 17).

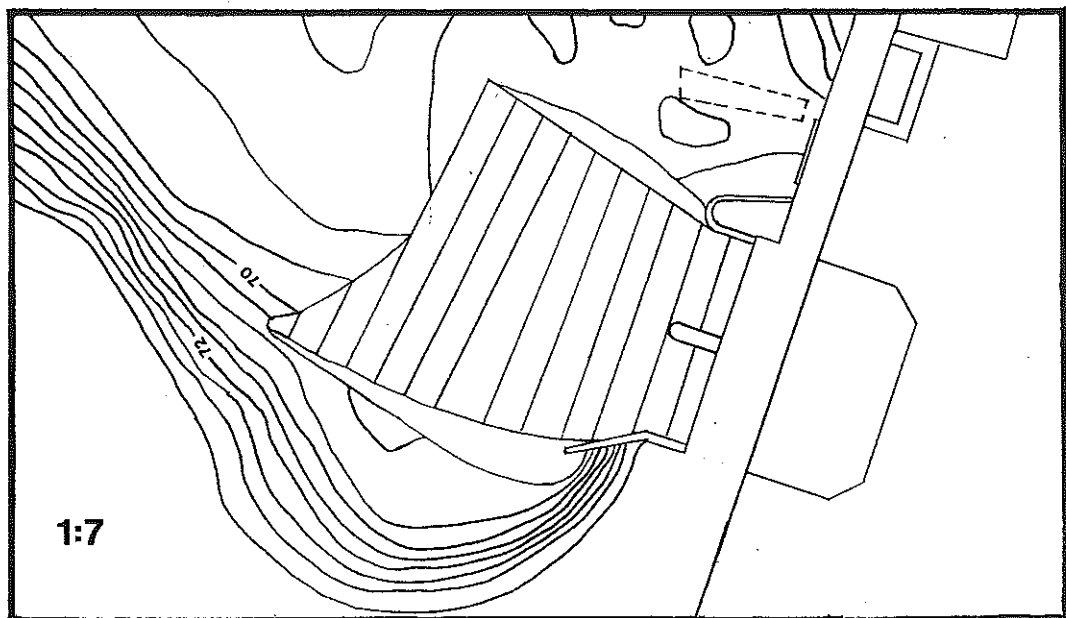
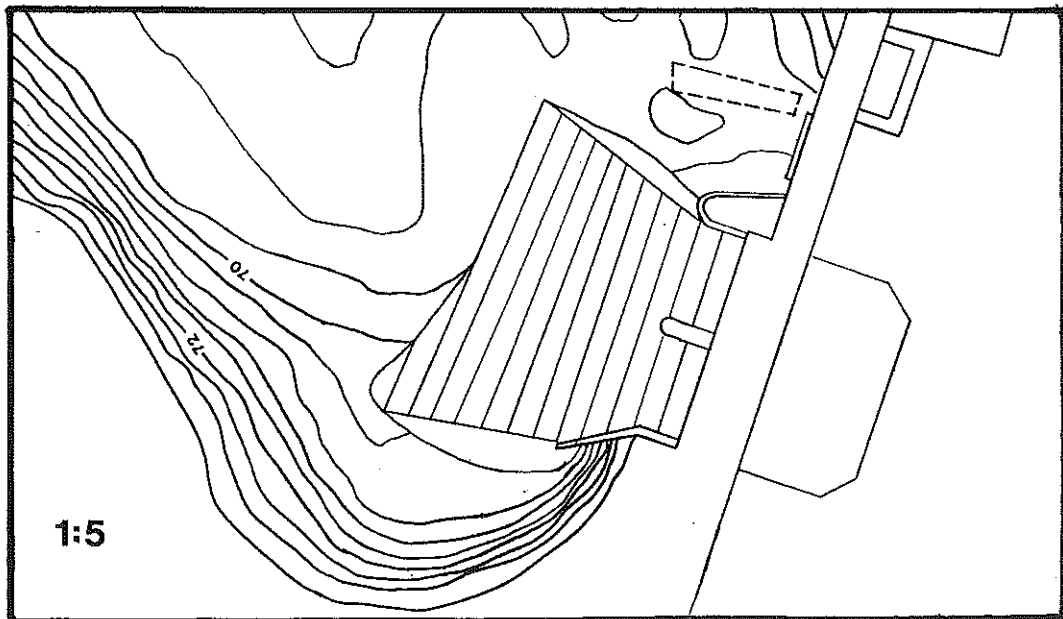
10.3 Överskottstappning

Överskottstappning, och därmed ändrade förhållanden, studerades med var och en av de två aggregaten avstängda och tappning av halva utbyggnadsvattenföringen genom utskovet. Det vill säga 46 m³/s genom en av turbinerna och 46 m³/s genom de båda nya utskovsluckorna.

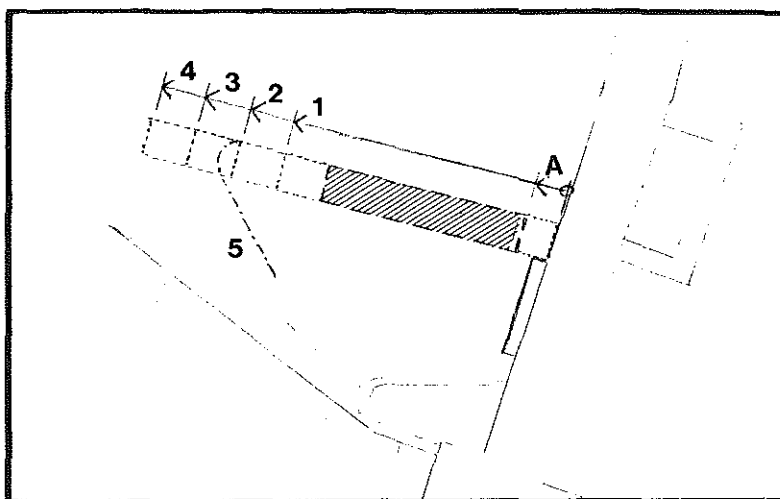
Dessutom studerades körning av en turbin men utan överskottstappning. Översiktligt har kontrollerats att maximal avbördning är tillräcklig, dels genom det nya utskovet och dels tillsammans med det gamla.



Figur 15. Undersökta bottenlutningar, in mot den nya kraftstationen, före revideringen av intaget.



Figur 16. Undersökta bottenlutningar, in mot den nya kraftstationen, efter revideringen av intaget.



Figur 17.

STENKISTAN UTFORMNING

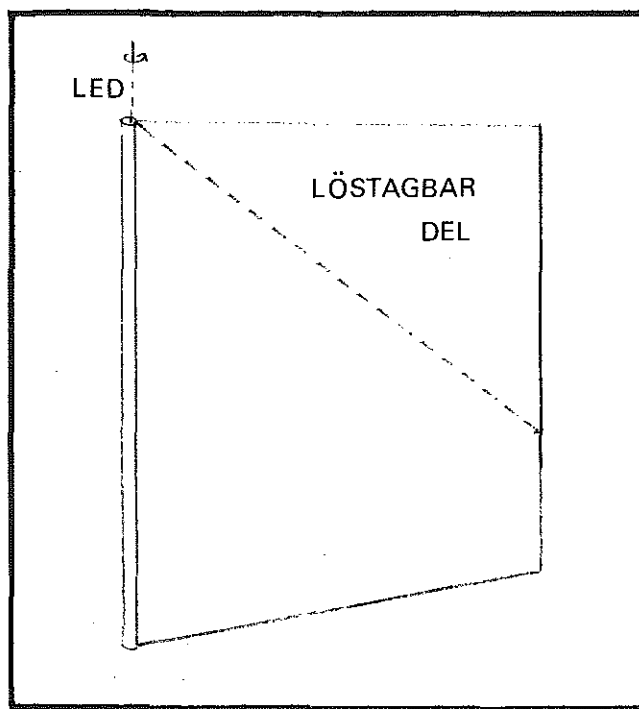
Olika testade alternativ vid schakt-lutning 1:5 efter revideringen.

	längd 11,4 m (befintlig stenkista)
1 -	15 m
2 -	17,5 m
3 -	20 m
4 -	22,5 m
5 -	alternativ 2 med styrvinge

Vid samtliga alternativ har stenkis-torna förlängts 1,5 m nedströms, så att de ansluter mot dammkroppen (A).

10.4 Stödmursriktning

Riktningen på den till högra intaget anslutande stödmuren har studerats genom att en led byggdes vid dess infästning så att olika godtyckliga riktningar kunde ställas in och dess påverkan bestämmas. För att få god anslutning till botten försågs modellen av stödmuren nertill med ett gummimembran. Den gjordes dessutom delbar så att man även kunde prova olika alternativ till utformning av dess överdel (figur 18).



Figur 18. Stödmur

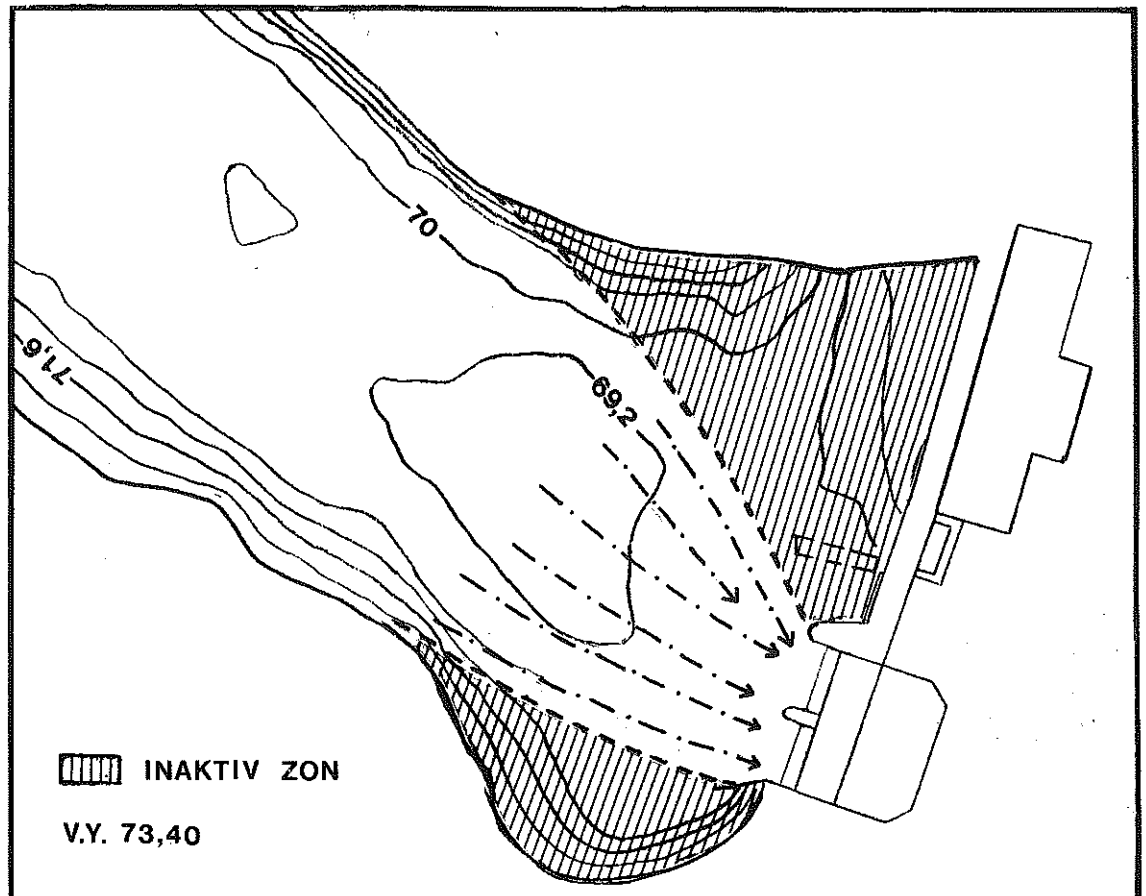
10.5 Svallningstendenser vid snabbstopp

Översvämningens risken vid snabbstopp av kraftstationen simulerades genom att intagsluckorna stängdes momentant. Därmed kunde den första uppsvallande vågen studeras. På grund av att modellen inte kan magasinera vatten på ett korrekt sätt har det fortsatta svallningförloppet ej studerats.

11 RESULTAT

11.1 Strömförhållanden

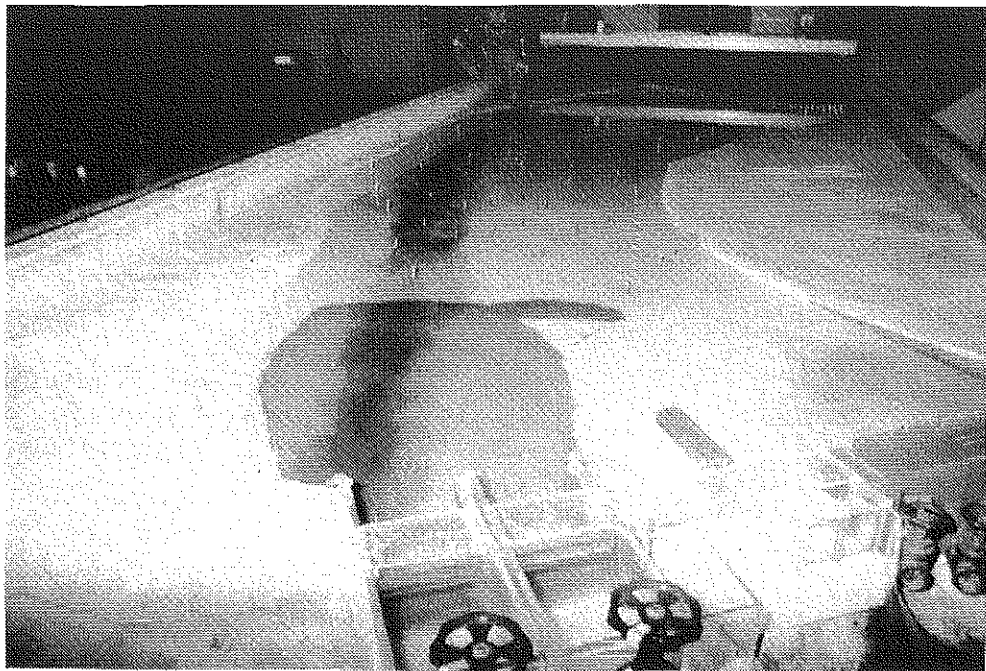
Redan i ett tidigt skede av mätningarna framkom att den huvudsakliga inströmningsriktningen mot kraftstationen är vriden 0-40° mot dess normalplan (figur 19 - 21).



Figur 19. Översikt av strömriktningar in mot den nya kraftstationen.



Figur 20. Strömning till det vänstra intaget.



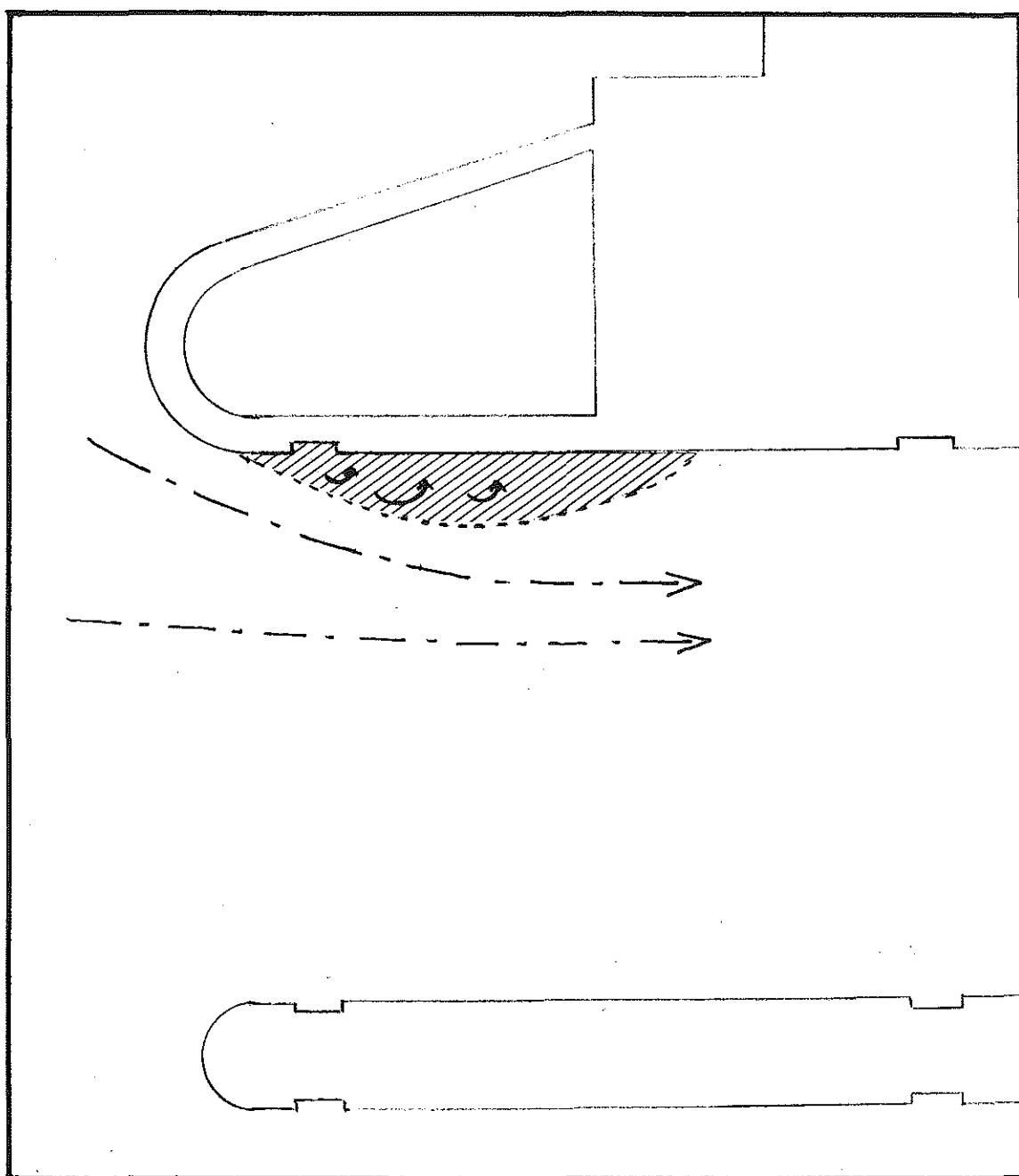
Figur 21. Strömning till det högra intaget.

11.2 Schaktlutning

Fortsatta mätningar, där bl a hastigheten mättes på olika djup i ett stort antal punkter, samt färgämnessläpp vid olika intressanta positioner, visade dock att en så brant schaktlutning som 1:5 ändå kunde tillåtas in mot den nya stationen, utan att några egentligen ogynnsamma strömförhållanden uppstod.

Den ovan nämnda ändringen av intagsbottens nivå antogs ej påverka strömförhållandena nämnvärt. Detta visade sig dock vara fel, eftersom problem nu uppdagades vid det vänstra intaget. Problemen bestod av avlösning vid intagets vänstra vägg, med tydliga tendenser till virvelbildning som följd (figur 22).

Förhöjningen av intagets botten medförde, om lutningen 1:5 fortfarande skulle bibehållas, att det krön, där lutningen börjar, flyttades närmare kraftstationen. Detta medförde att den vinkelräta hastighetskomponenten vid intagets vänstra vägg gavs ett så stort tillskott, att avlösning och virvlar antyddes.



Figur 22. Avlösningsszon vid det vänstra inta-
gets vänstra vägg.

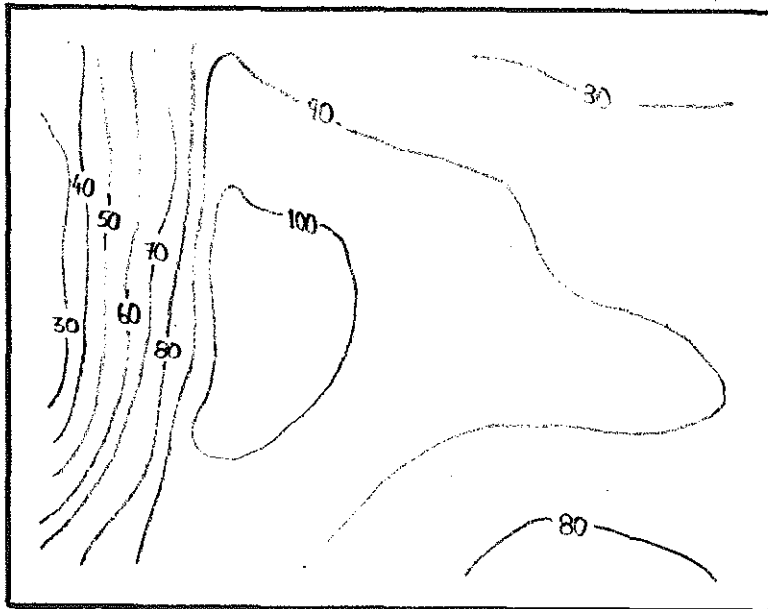
För att få en mer detaljerad bild av strömningsförhållandena vid intaget, gjordes hastighetsmätningar i ett stort antal punkter i en tvärsektion omdedelt framför detta. Med dessa som grund, upprättades sedan sk isoveler för intagen. Mätningarna utfördes med två olika lutningsalternativ - 1:5 och 1:7 (figur 23 - 24).

Ur isovelerna kan man dra några viktiga slutsatser:

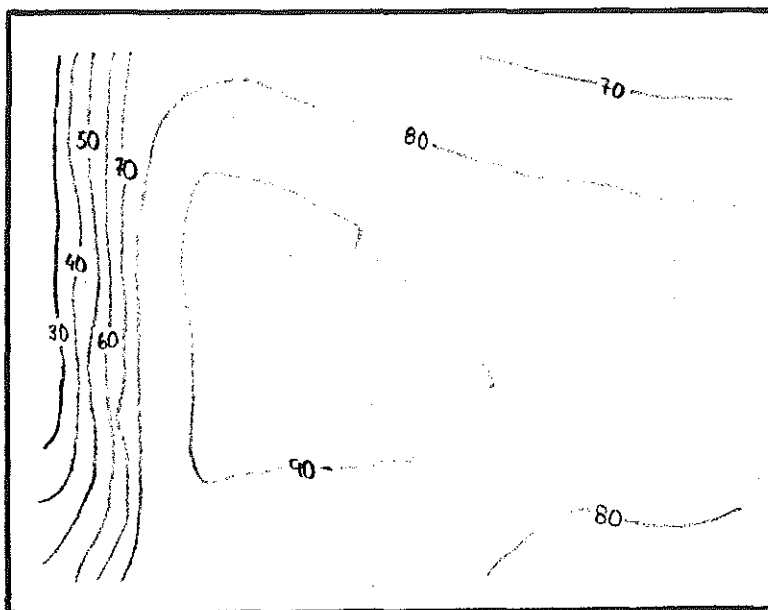
- I vänster intag finns en låghastighetszon, vilken är cirka 1,5 ggr större i 1:5-lutningen, jämfört med 1:7-lutningen.
- Hastighetsfördelningen i höger intag är bra för båda alternativen.

Det är i den nämnda låghastighetszonen som tendenserna till virvelbildning upptäckts. Det bör påpekas att tydliga virvlar ej kunnat observeras, utan endast tendenser. Det finns inte heller några punkter, där vattnets absoluta hastighet är negativ, även om det i en och samma punkt är stor variation på hastigheten i tiden. (Dvs vattnet strömmar alltid in mot kraftverket).

Vid mätningarna registrerades, förutom medelvärden, även min- och maxvärden för varje mätserie (integreringstid 10 sekunder). Dessa avviker i låghastighetszonen med 10-30% från medelvärdet. I resten av vänstra intaget och i hela högra intaget är avvikelserna 2-12 procent.

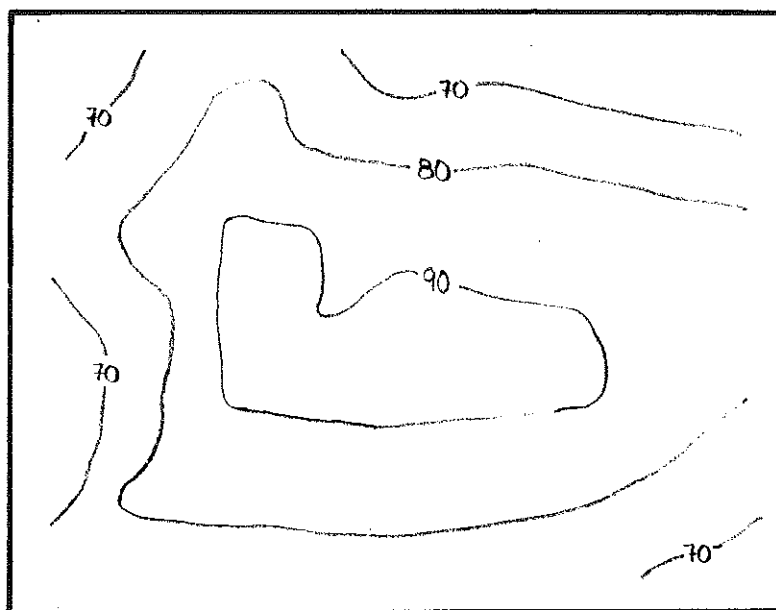


a - Schaktlutning 1:5

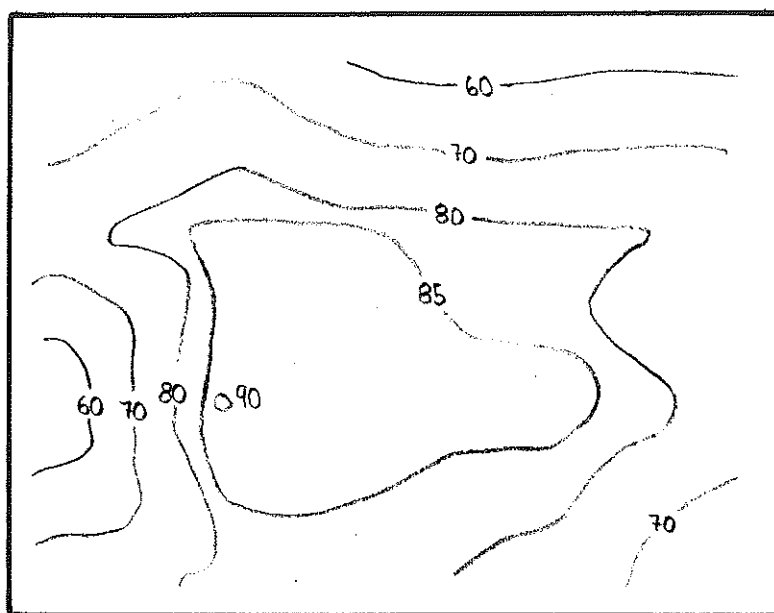


b - Schaktlutning 1:7

Figur 23. VANSTER INTAG
Isoveler för sektion 1m framför intaget
Hastigheterna angivna i cm/s
Teoretisk medelhastighet: 88 cm/s
Skala 1:80



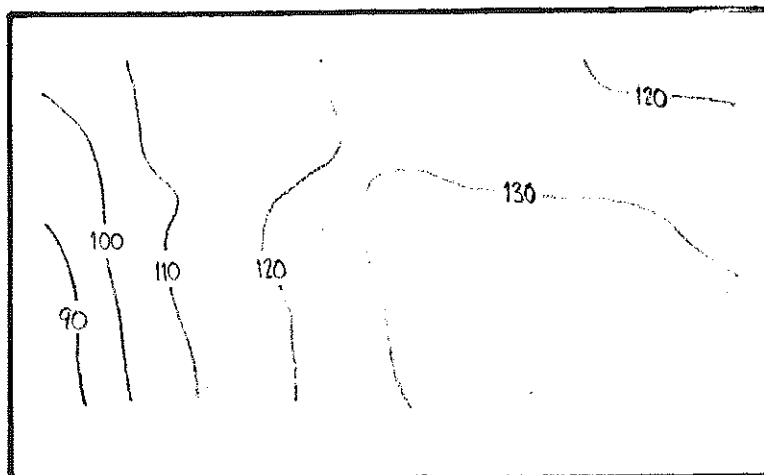
a - Schaktlutning 1:5



b - Schaktlutning 1:7

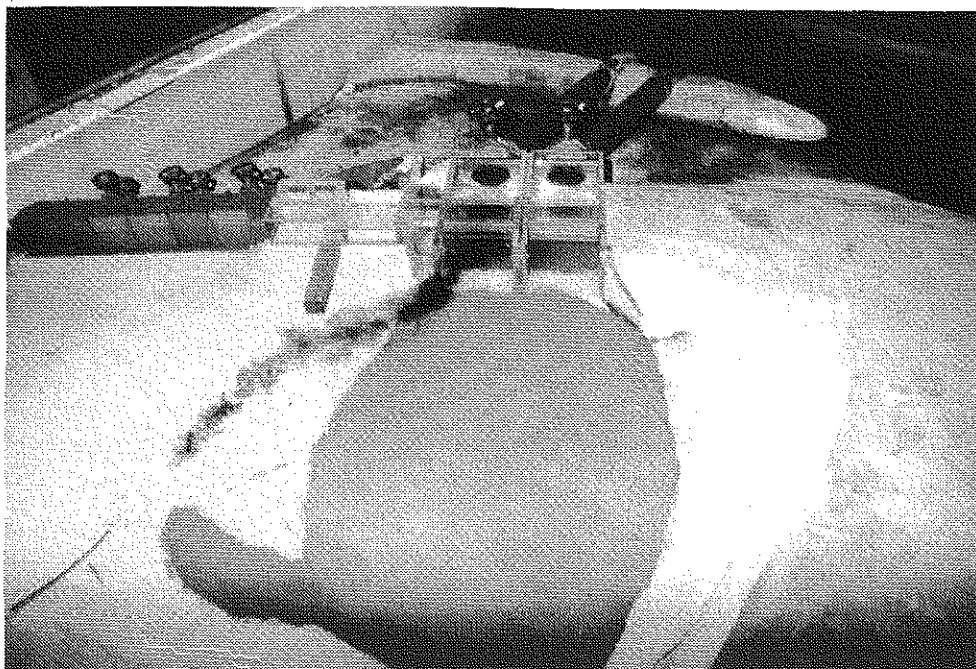
Figur 24. HÖGER INTAG
Isoveler för sektion 1 m framför intaget
Hastigheterna angivna i cm/s
Teoretisk medelhastighet: 88 cm/s
Skala 1:80

För att få en uppfattning om hur långt in i intaget låghastighetszonen sträcker sig gjordes även, för 1:7 lutningen, mätningar i en tvärsektion genom den vänstra intagsluckan. Dessa isoveler framgår av figur 23 och visar att hastigheten fortfarande är något lägre vid den vänstra kanten, men att skillnaden är avsevärt mindre. Här har virveltendenserna helt försvunnit.



Figur 25. VANSTER INTAG
Isoveler för sektion genom avstängningslucka.
Hastigheterna angivna i cm/s
Teoretisk medelhastighet: 115 cm/s
Schaktlutning 1:7
Skala 1:80

Detta förhållande tyder på att acceptabla inströmningsförhållanden kommer att uppnås, trots att inströmningsriktningen fortfarande är sned (figur 26).



Figur 26. Strömning vid det vänstra intagets vänstra vägg.

11.3 Inverkan av stenkista

En alternativ lösning till att minska schaktlutningen har undersökts. Den går ut på att med hjälp av en utbyggnad av den stenkista som finns placerad strax uppströms de bägge utskoven, minska den vinkelräta hastighetskomponenten såpass mycket att problemen vid intaget upphör. Resultaten av dessa undersökningar är att stenkistan borde förlängas med cirka 10 meter samt anslutas nedströms mot dammkroppen, för att acceptabla förhållanden åter skall erhållas. Dessutom bör den förhöjas upp till vattenytan.

Alternativt kan en vinge monteras utanför kistan, vilken då endast behöver förlängas med 5 m.

Om någon av dessa båda åtgärder skall genomföras, krävs dock en ny vattendom, och eftersom kostnaden nästan är lika stor som för minskad schaktlutning, verkar det sistnämnda vara en lämpligare åtgärd.

Att ansluta stenkistan mot dammen (cirka 1,5 m utbyggnad) samt att förhöja den upp till vattenytan är en relativt liten åtgärd som dock har en bra effekt på strömförhållandena. Därför anser vi att man bör göra detta även i samband med alternativet med minskad schaktlutning.

11.4 Överskottstappning

Den tappning som måste ske genom utskoven, ska företrädesvis ske genom de fjärrmanövrerade luckorna. Det gamla utskovet som är försett med spettluckor kommer endast att användas i undantagsfall.

Det resultat som erhöles, vid körning av endast en turbin och överskottstappning av vatten genom det nya utskovet, visade att några problem ej uppstod. Dock är det mer fördelaktigt ur strömnings-synpunkt, att köra det vänstra aggregatet men skillnaden är inte speciellt stor.

Full tappning i båda turbinerna ($92 \text{ m}^3/\text{s}$) och full tappning genom det nya utskovet, visade på en betryggande marginal för exceptionellt stora flöden. Dessutom finns, som redan nämnts, även det gamla utskovet att ta till. Det bör dock anses näst intill uteslutet, att detta skulle behöva användas, såvida inte någon av de nya utskovsluckorna, eller båda turbinerna av någon anledning är ur funktion.

11.5 Stödmursriktning

Olika riktningar, på den stödmur som ansluter mellan det högra intagets högra vägg och den intilliggande slänten, har testats. Resultaten visar att strömförhållandena inte nämnvärt påverkas av hur muren riktas. Det från ABV framlagda förslaget med en riktning på 30° mot kraftstationens normalplan ger därför bra resultat.

11.6 Svallningstendenser vid snabbstopp

Vid undersökning av svallningstendenserna vid snabbstopp, har det klarlagts att ett sådant ej kommer att innebära någon fara för kraftstationen med till exempel översvämning som följd. Vid ett försök med momentan stängning av luckorna till kraftverket, erhöles en första uppsvallning, på cirka 40 cm (prototypvärde). Avståndet mellan dammkrönet och dämningssgränsen är nära 1 m. Dessutom anser vi att vår momentana stängning ger en för stor uppsvallning jämfört med en verklig, där stängningsförloppet är långsammare. Tidsskalan mellan modell och prototyp är ungefär 1:6,3, som med den planerade stängningstiden på 10 minuter ger en modellstängningstid på c:a 1.5 minuter. En överslagsberäkning, med momentan stängning, ger en svallvåg på cirka 50 cm. (bilaga 9).

För att kunna bedöma modellförsökens tillförlitlighet, måste man beakta de felkällor som finns.

Bottengeometrin har beräknats med antagande av linjär variation mellan de drygt 150 djupmätningsspunkterna. Eftersom den skapade terrängmodellen uppvisar en tydlig och regelbunden kanalform och även stora likheter med äldre bottenkartor, kan noggrannheten anses vara god. Modellens geometri har en mycket god överensstämmelse med den skapade numeriska terrängmodellen och avvikelserna ligger inom ± 1 mm, vilket motsvarar 40 mm i prototypen.

De avvikelser i hastighet som observerats mellan prototyp och modell, ligger inom mätinstrumentens/mätmetodernas felmarginal. Fältflygeln har i sig en bra noggrannhet, men på grund av svårighet att bedöma strömriktningen, samt påverkan från mätbåtens rörelser med nera, kan mätmetoden ge relativa fel på 10-15 procent. Den mikroflygel som använts i modellen är mycket känslig för föroreningar i vattnet, mikrofibrer med mera. Trots att den kalibreras både före och efter varje mättag, kan den ej anses ge värden med relativa fel mindre än 10 procent. Hastigheten har bestämts som ett medelvärde över 2-3 minuter, vilket är en avsevärt längre tid än de observerade variationernas varaktighet.

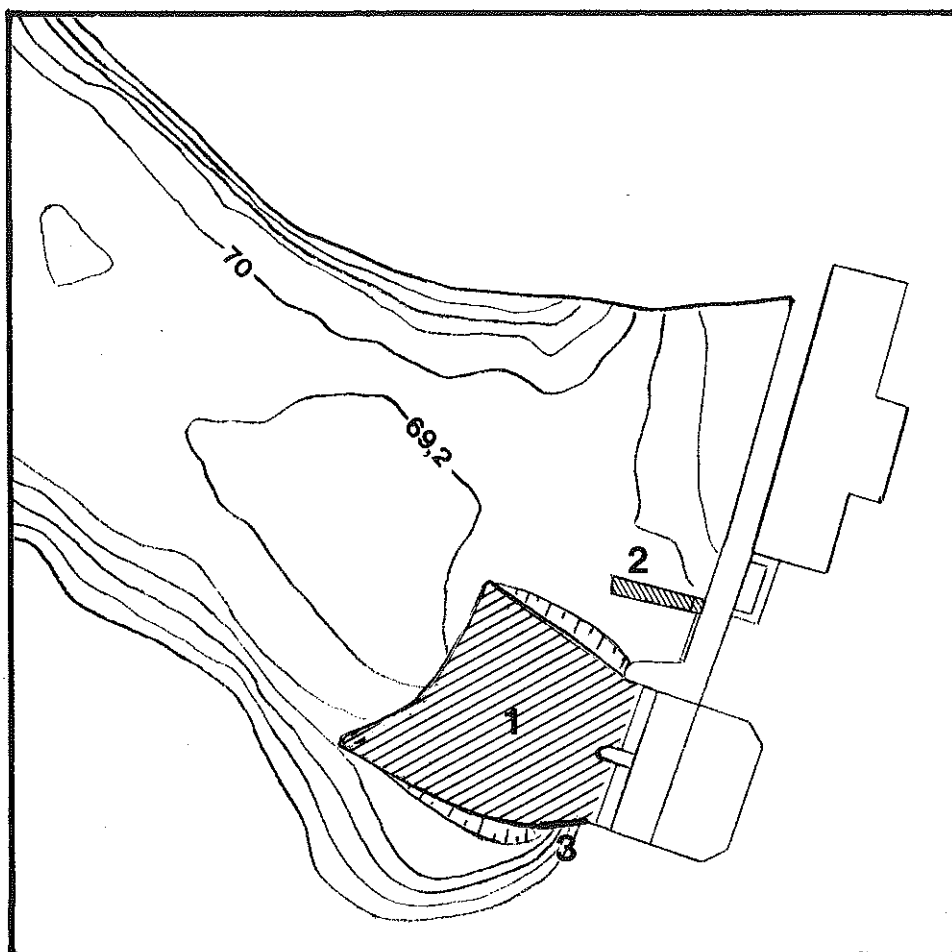
De flödesmätningar som gjorts i modellen har mycket god noggrannhet eftersom mycket tillförlitliga mätmetoder använts. Flödesmätaren har ett relativt fel som är mindre än 0,5 procent.

Råheten har ej kunnat simuleras på ett riktigt sätt, men på en så kort sträcka som i modellen ger råheten ingen mätbar påverkan (se avsnittet om kalibrering).

En tänkbar källa till felbedömning är att strömförhållandena mestadels studerats visuellt med hjälp av färgämne som släppts i vattnet. Detta är dock en gängse metod i modellsammanhang som anses vara bra. Eftersom både vi, handledare och uppdragsgivare studerat de aktuella problemen och dragit samma slutsatser, anser vi att bedömningarna är pålitliga.

Det slutgiltiga förslaget till utformning framgår av figur 27 och är:

- 1 - Schaktlutningen in mot den nya kraftstationen utförs med lutningen 1:7.
- 2 - Den befintliga stenkista, som finns strax framför utskoven, förlängs nedströms så att den helt ansluter till dammkroppen mellan utskoven. Dessutom förhöjs den så att konstruktionen når ända upp till vattenytan.
- 3 - Den stödmur som ansluter till intagets högra del med den intilliggande slänten, anläggs med en riktning av 30° från dammkroppens normalplan.



Figur 27. Förslag till utformning.

14. REFERENSER OCH LITTERATUR

Samtliga referenser avser: Cederwall Klas, Larsen Peter, Hydraulik för Väg- och Vattenbyggare, Liber Läromedel, Malmö, upplaga 2:2, 1981.

[1] - kapitel 7.4 Likformighetsvillkor formulerade med hjälp av rörelseekvationer. sid 7.12-17

[2] - exempel 7.4 Strömning med fri vattenyta. Sid 7.16-17

[3] - kapitel 7.5 Skalförhållanden vid Froudes resp Reynolds modellregler.

- Övrig litteratur:
- Krobs Helmut (editor), Hydraulic Modelling, Verlaug Paul Parey - Hamburg, 1980.
 - Water and Power Resources Service, U.S. Department of Interior, Hydraulic Laboratory Techniques, United States Government Printing Office, Denver, Colorado, 1980.
 - Yalin M S, Queens university at Kingston, Canada, Theory of Hydraulic Models, The Mac-Millan Press Ltd, London, 1971.

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

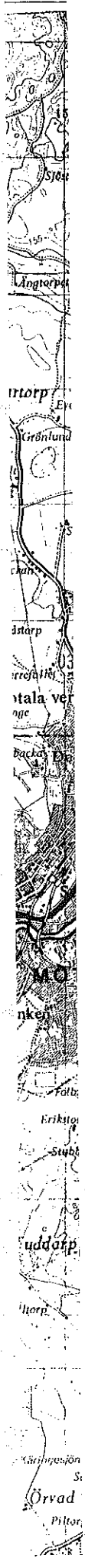
1

1

1

1

1



1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1





100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

CONTAI

1

2

3

4

5

6

7

8

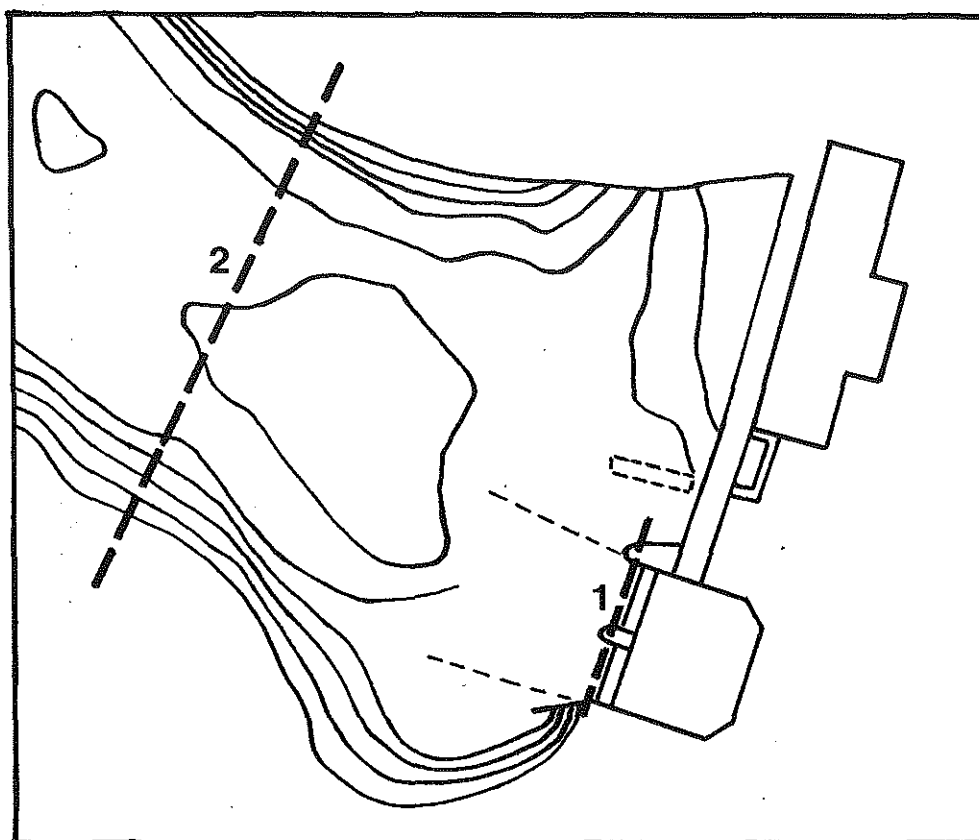
B.7 UPPSVALLNING VID MOMENTAN STANGNING

1. Beräkningsfall

Två olika skeden av svallningen har beräknats:

- 1) Uppsvallning i intagssektionen vid momentan fullständig avstängning.
- 2) Svallning i strömfårans minsta sektion vid momentan fullständig avstängning.

Sektionernas lägen anges i figur 1.



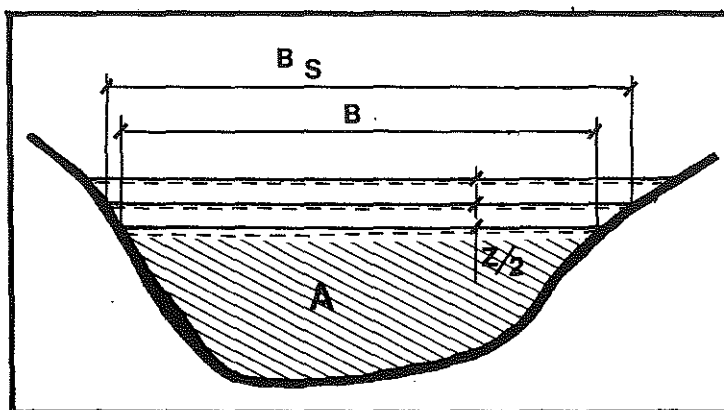
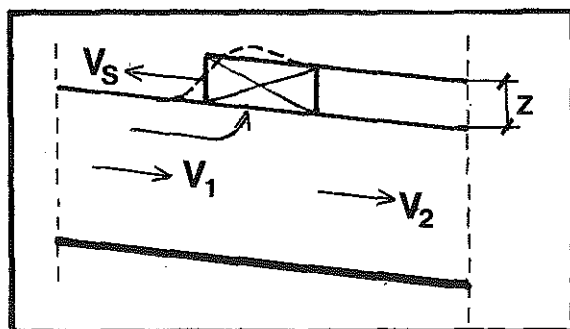
Figur 1. BERÄKNINGSSEKTIONER
1) Intagssektionen
2) Minsta kanalsektionen

2. Ekvationer och beteckningar

Beräkningarna bygger på följande samband hämtade ur Handboken Bygg [B1]. (Se även figur 2).

$$V_s = -V_1 + \sqrt{g \left(\frac{A}{b_s} + \frac{3z}{2} \right)} \quad \dots (1)$$

$$z = \frac{Q_1 - Q_2}{b_s * V_s} \quad \dots (2)$$



Figur 2. Beteckningar

där

- V_1 = Vattenhastighet i kanalen före svallning [m/s]
- V_s = Svallvågens fortplantningshastighet [m/s]
- Q_1 = Vattenföring före svallning [m^3/s]
- Q_2 = Vattenföring efter svallning [m^3/s]
- A = Kanalens tvärsnittsarea före svallning [m^2]
- b_s = Ytbredden vid halva svallningshöjden [m]
- z = Svallninghöjd [m]
- g = Tyngdkraftens acceleration (9,81) [m/s^2]

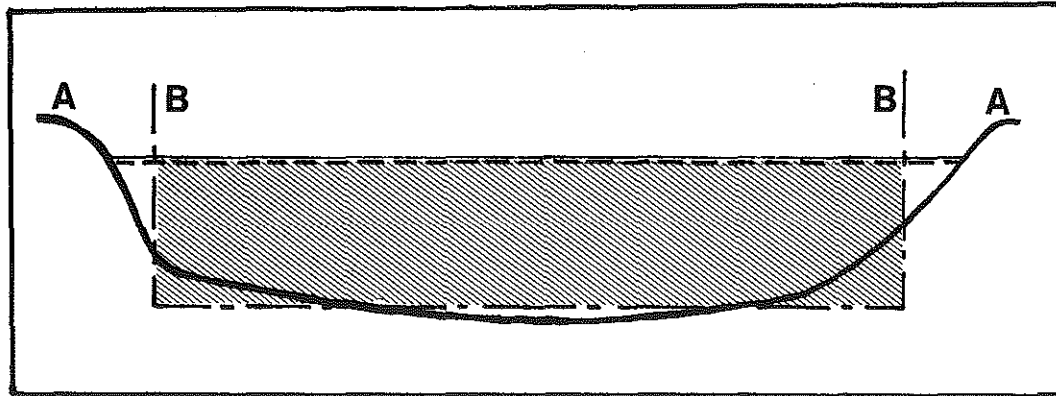
Då beräkningen avser fullständig stängning blir $Q_2 = 0$ och

$$z = \frac{Q_1}{b_s * V_s} \quad \dots (3)$$

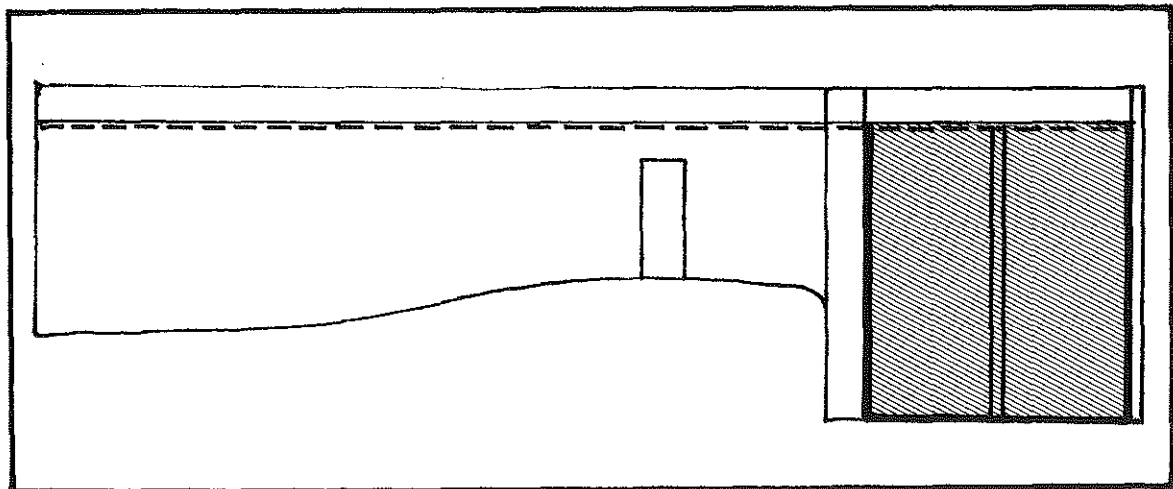
3. Verkliga och idealiserade kanalsektioner

Strömfårans tvärsektion har beräkningsmässigt antagits vara rektangulär men med korrekt area (figur 3).

Intagssektionens area har valts till arean mellan intagets väggar. Här är sektionsformen rektangulär i prototypen varför ingen idealisering gjorts (figur 4).



Figur 3. STRÖMFARANS SEKTION
A) Verklig
B) Idealiserad
Längdskala 1:500
Höjdskala 1:200
(Höjdskatan förställd 2,5 gånger.)



Figur 4. INTAGETS SEKTION
Längdskala 1:500
Höjdskala 1:200
(Höjdskatan förställd 2,5 gånger.)

4. Svallning i intaget

Antagna data

$$\begin{aligned} Q_1 &= 92 \quad \text{m}^3/\text{s} \\ A &= 16,4 \times 7,81 = 128 \quad \text{m}^2 \\ V_1 &= Q_1 / A = 0,718 \quad \text{m} \end{aligned}$$

Beräkning med vågbredden $b_s = 16,4$ m ger en svallhöjd på

$$z = 0,65 \text{ meter}$$

Beräkning med dubbla vågbredden ($b_s = 32,8$ m) ger

$$z = 0,47 \text{ meter}$$

5. Svallning i minsta sektion

Antagna data

$$\begin{aligned} Q_1 &= 92 \quad \text{m}^3/\text{s} \\ A &= 50 \times 4 = 200 \quad \text{m}^2 \\ b_s &= 50 \quad \text{m} \\ V_s &= Q_1 / A = 0,46 \quad \text{m} \end{aligned}$$

Dessa värden ger en svallningshöjd på 0,30 meter

6. Tolkning och kommentarer

Enligt Handboken Bygg är vågfronten något större än efterföljande våg. Detta skulle innebära att svallningen i intaget kan uppskattas till mellan 55 - 75 cm.

För att vågen skall kunna anses ha en bredd av 16,4 m får den inte nå utanför intagsväggarna innan den nått sin fulla höjd. När den når utanför väggarna sprider den sig i sidled. Denna spridning är svår att beräkna men om man antar att den sker med samma hastighet som vågen fortplantas uppåt borde den ganska snabbt nå dubbla bredden. (Vågens fortplantningshastighet kan beräknas med ovan använda ekvationer och blir då 6 - 8 m/s.)

Ett lämpligt värde på våghöjden vid intaget skulle då kunna sättas till cirka 65 centimeter vid momentan fullständig stängning av intagsluckorna.

Det verkliga stängningsförloppet kommer dock inte att vara momentant, utan är planerat att ta 10 minuter. Detta innebär att stängningsförloppet är åtskilligt långsammare än svallningsförloppet som ju går med en hastighet av cirka 6 m/s i kanalen. Effekten av detta blir att svallningen inte blir så kraftig då systemet hinner jämna ut uppkomna vågor på ett bättre sätt.

Vår uppfattning är att den reella svallningen inte kommer att överstiga 30 centimeter med ovan angivna förutsättningar.

Den tillgängliga höjden, det vill säga avståndet mellan dammkrön och dämningssgränsen är nära 1 meter, så risken för översvallning av dammen får anses som minimal.

7. Referenser

- [B1] Handboken Bygg, del 9, tredje upplagan,
paragraf 963:282, sidan 706,
Byggmästarens förlag,
Stockholm, 1966.

