VASO dammkommittés rapport nr 5

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

VERKLIG AVBÖRDNINGS-KAPACITET

ELFORSK

VASO Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 5

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

VERKLIG AVBÖRDNINGS-KAPACITET

Nils Johansson, Vattenfall Utveckling, Anläggning
Karl Rytters, VBB Anläggning

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall
Grafisk form: Fras&Form
Tryck: Spånga Tryckeri AB 1995
ISSN 1400-7827

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD		i
SAMMANFATTNING		ii
SUMMARY		iv
1.	**INLEDNING**	1
2.	**ORSAKER TILL NEDSATT AVBÖRDNINGSFÖRMÅGA**	2
2.1.	**Allmänt**	2
2.2.	**Ytutskov**	2
2.3.	**Bottenutskov**	4
2.4.	**Praktiska erfarenheter**	6
2.4.1.	Provtappningar	
2.4.2.	Andra erfarenheter	7
3.	**METODER ATT BESTÄMMA AVBÖRDNINGSKAPACITET**	9
3.1.	**Teoretiska beräkningar**	9
3.2.	**Matematisk modellering**	10
3.2.1.	Allmänt	10
3.2.2.	Bottenutskov vid Holmens kraftverk	12
3.2.3.	Ytutskov i Trängslet	14
3.2.4.	Utskov vid Mellanfallet, Älvkarleby kraftverk	15
3.3.	**Fysiska modellförsök**	17
3.3.1.	Allmänt	17
3.3.2.	Hydraulisk avbördningskapacitet	18
3.3.3.	Teknisk avbördningskapacitet	19
3.4.	**Provtappningar**	20
3.5.	**Kostnader**	22
4.	**SLUTSATSER**	23
4.1.	**Allmänt**	23
4.2.	**Prioritering**	23
4.3.	**Metodval**	24
5.	**REFERENSER**	26
6.	**BILAGOR**	27

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson – Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu – Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Föreliggande projekt har genomförts av Nils Johansson, Vattenfall Utveckling AB och Karl Rytters, VBB Anläggning AB med Malte Cederström, Vattenfall och Lennart Markland, Vattenregleringsföretagen som ansvariga ombud för beställaren.

Rapporten beskriver svårigheter att fastställa olika utskovs avbördningskapacitet och redovisar olika metoder att bestämma avbördningskapaciteten såsom teoretiska beräkningar, matematisk modellering, fysiska modellförsök och provtappningar.

Det finns anledning att, om det inte redan är gjort, göra en översyn av utskovens avbördningsförmåga och därvid beakta de faktorer, som nämns i denna rapport. Detta gäller även dammar i klass II, men dammar i klass I bör prioriteras, speciellt de som är svåra att rätt bedöma.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

I föreliggande rapport har två begrepp införts när det gäller utskovs avbördningskapacitet. Den **hydrauliska** avbördningskapaciteten avser utskovets kapacitet utan hänsyn till erosion, översvämning etc på utskovet eller dess nära omgivning. Den **tekniska** avbördningskapaciteten är utskovets kapacitet när hänsyn tas till dessa begränsande faktorer. **Erfarenheterna visar att den tekniska avbördningsförmågan hos utskov i svenska dammar ofta är betydligt lägre än förväntat.**

Orsaken kan vara alltför schablonmässiga bedömningar av den hydrauliska kapaciteten eller olika tekniska begränsningar som gör att den hydrauliska kapaciteten inte kan utnyttjas. Vanliga begränsningar är höga vattennivåer, kavitation eller erosion. Ofta har utskoven och dess vattenvägar aldrig konstruerats för att fungera under längre tid med hög tappning eftersom man förväntat sig att sådana förhållanden bara skulle uppträda mycket tillfälligt. Genom Flödeskommitténs riktlinjer har emellertid dimensionerande flöden för många dammar fått såväl högre topp som längre varaktighet, vilket innebär att den äldre designfilosofin måste ifrågasättas.

Den tekniska utskovskapaciteten kan börja avta efter ett antal decennier i utskov, vattenvägar och energiomvandlare som är beroende av funktionen hos installerade bergförankringar.

Erfarenheterna från utförda provtappningar visar att provtappningar är mycket värdefulla när det gäller att bestämma utskovens tekniska avbördningskapacitet. Vid flera tillfällen har provtappningar lett till att man insett behovet av ombyggnader och förstärkningar av utskov och anordningar i nära anslutning till utskoven.

För att ta fram ett alternativ till fysisk modellering vid bestämning av utskovs hydrauliska avbördningskapacitet och i viss mån också teknisk avbördningskapacitet har inom projektet utförts en matematisk modellering av ytutskoven i Trängslet och i Mellanfallet, Älvkarleby. Dessutom redovisas en matematisk modellering av ett bottenutskov i Holmens kraftverk i Norrköping. Matematisk modellering bedöms ha en stor potential men man får inte underskatta svårigheterna nu i initialskedet i utvecklingen. Det krävs tid för att bygga upp de erfarenheter som behövs för att få ett pålitligt och noggrant verktyg.

Flödesbestämning i samband med provtappning har visat sig vara svårt och den traditionella metoden med flygelmätning har gett dålig noggrannhet. För att kunna genomföra provtappningar med god noggrannhet på flödesmätningen rekommenderas nya metoder som bygger på akustisk mätteknik. I vissa fall där förhållandena är gynnsamma bör man kunna utnyttja närliggande kraftstationers turbiner för flödesmätningen.

I flera fall har dokumentationen om utförd provtappning varit bristfällig. Det bör vara provledarens ansvar att en bra dokumentation kommer till stånd.

Det är ibland svårt att i fält prova utskov till full kapacitet på grund av risk för skador. Man är då hänvisad till andra metoder för att bestämma kapaciteten. Fysiska modeller är noggrannast (och dyrast) följt av matematiska modeller och teoretiska beräkningar.

Vid val av de utskov där man i första hand bör kontrollera utskovskapaciteten, bör man se

på hur svåra konsekvenser en felaktigt uppskattad utskovskapacitet kan ge. **Det bör sålunda ske en kvalificerad teknisk-hydraulisk granskning av samtliga utskov vid klass I-dammar.** Dessutom bör man vid urvalet ta hänsyn till svårigheterna att rätt uppskatta utskovskapaciteten. De utskov som både ger svåra konsekvenser och är svåra att rätt uppskatta utskovskapaciteten på är särskilt angelägna att kontrollera. En översyn av utskov vid klass II-dammar bör därefter också göras.

SUMMARY

This report defines two kinds of spillway discharge capacities. The hydraulic spillway capacity is the theoretical discharge capacity of the structure with no regard to restrictions imposed by erosion, inundation, vibrations etc on the spillway or its surroundings. The **technical** spillway capacity is the discharge capacity with regard to such restricting factors.

With the aim of developing an alternative to physical modelling for determination of hydraulic spillway capacity and to some extent also technical spillway capacity, a mathematical modelling has been made of surface spillways in Trängslet and Mellanfallet, Älvkarleby. Moreover, a mathematical model of a bottom outlet at the Holmen power plant is presented. Mathematical modelling is a technique with large potential but the initial difficulties should not be underestimated. There will be some time before having gained enough experience for an accurate and reliable engineering tool.

The available experience from prototype discharge tests indicates that such tests are of great value for the determination of technical spillway capacities. On several occasions such tests have initiated reconstruction and strengthening of spillways and adjacent structures.

Flow measurements have proved to be difficult during prototype discharge tests and the traditional method, using current meters, has given inaccurate results. New acoustic techniques are recommended. However, where the conditions are favourable, nearby hydro turbines can be used for flow measurements.

The documentation of performed prototype discharge tests has in several cases been insufficient. A designated test leader should be responsible for the provision of an adequate documentation.

It is sometimes difficult to perform prototype discharge tests because of the risk of causing damage along the river downstream. In such cases other methods are required to determine discharge capacity. Physical modelling is the most accurate (and expensive) method available, followed by mathematical modelling and theoretical calculations.

In the first instance those spillways should be investigated where a mistake in the determination of the discharge capacity can lead to serious repercussions or where the discharge capacity is unusually difficult to estimate. Spillways meeting both these criteria are of course especially important to check.

1. INLEDNING

I avsikt att kontrollera avbördningskapaciteten har kraftindustrin utfört ett antal provtappningar vid utskov i svenska dammar och det har då visat sig att avbördningskapaciteten ibland är lägre än förväntat. Det är med hänsyn till dammsäkerheten naturligtvis av stor vikt att man känner den verkliga kapaciteten. Inför den anpassning av svenska dammar som skall ske till dimensionerande flöden enligt Flödeskommittens riktlinjer finns det således anledning att kritiskt granska gjorda antaganden beträffande avbördningskapacitet. Föreliggande rapport syftar till att ge stöd och riktlinjer vid denna process och ange lämpliga metoder för verifiering av den verkliga avbördningskapaciteten för olika typer av utskov.

2. ORSAKER TILL NEDSATT AVBÖRDNINGSFÖRMÅGA

2.1. Allmänt

Gränserna för avbördningen genom ett utskov sätts i första hand av dess **hydrauliska avbördningskapacitet**, dvs kapaciteten hos en på visst sätt placerad, fri vattenväg med viss angiven geometri, ytjämnhet och omgivning.

Kapaciteten kan emellertid påverkas av att verkliga dimensioner avviker från de som antagits vara för handen. Det gäller särskilt dimensionerna på anslutande naturliga vattendrag och sprängda eller schaktade vattenvägar.

Ytterligare gränser för utskovs **tekniska avbördningskapacitet** kan sättas av utskovets och dess omgivnings förmåga att fungera vid hög tappning i det aktuella utskovet. Det kan vara höga vattenstånd, vågor eller höga vattenhastigheter, höga eller låga tryck, vattenstänk, vibrationer, pulserande strömning, luftinblandning och luftavgivning mm, som påverkar utskoven med anordningar för energiomvandling, vattenvägar, kraftförsörjning, luckmanövreringsutrustning och driftpersonal eller damm, kraftstation och tillfartsvägar. En utmärkt illustration av förekommande begränsningsfaktorer och svårigheterna att bestämma utskovs kapacitet ges av de provtappningar i fält som utförts.

För den dammsäkerhetsmässiga värderingen av utskov tillkommer en rad ytterligare begränsningar, som kan innebära att utskovskapacitet **i vissa lägen** kan slås ut eller begränsas av yttre och inre faktorer som t ex strömavbrott, brand, låg temperatur, stark vind eller intensiv nederbörd i närområdet eller i andra delar av nederbördsområdet. Dessa förhållanden kan exempelvis leda till att utskovs avstängningsanordningar inte kan avlägsnas i tid på grund av svårigheter med luckor och manöverorgan, tillfarter, etc. Även riskerna för igensättning av vattenvägarna med sediment eller flytgods såsom is, lossryckta träd, timmerstockar, flytmyrar o dyl må beaktas. Enligt Flödeskommittens riktlinjer får endast sådana avbördningsanordningar, som med full säkerhet kan tas i anspråk med kort varsel, medräknas vid avbördning av dimensionerande flöden.

2.2. Ytutskov

Den vanligaste orsaken till att ytutskovs hydrauliska avbördningskapacitet avviker från den förväntade är en alltför schablonmässig uppskattning av avbördningsförmågan utan tillräcklig hänsyn till sidokontraktion och sned eller eljest mindre god tillströmning. Dessa faktorer är viktiga för alla förekommande typer av ytutskov och kan lätt leda till överskattningar av kapaciteten med 10–15%. För vissa typer av utskov kan effekterna vara betydligt större.

Ännu viktigare för den hydrauliska avbördningskapaciteten är att man tar hänsyn till möjlig indämning av utskoven, dvs att nedströms vattenstånd är så högt att det påverkar avbördningsförmågan. Framförallt om vattenvägen (älvfåran) är smal relativt sett, har dåligt fall, överkorsas av broar eller är försedd med andra hinder för strömningen bör denna risk beaktas. Effekterna kan ibland göra sig påminda först vid mycket höga tappningar. Erfarenheter från den normala driften **kan** således vara förvillande. Indämning kan också uppträda vid erosion och ras, vid isdämmor eller vid tillfälliga överdämningar i nedströms belägen damm.

Tekniska begränsningar av avbördningsförmågan hos ytutskov utgörs annars ofta av lokala översvämningar och erosionsskador som kan hota damm, tillfarter, manöverutrymmen, krafttillförsel eller annan dammsäkerhetsmässigt väsentlig infrastruktur.

För själva utskovskonstruktionen gäller att stabilitetsproblem, kavitationsskador och andra erosionsskador kan uppstå på grund av höga hastigheter och låga eller höga tryck.

Vid turbulent strömning fluktuerar trycket mot en vattenvägs begränsningsytor. Storleken på tryckvariationerna beror av den aktuella vattenhastigheten. Typiska frekvenser ligger inom intervallet 1–20 Hz. Inom områden med störd strömning, t ex i vattensprång är tryckvariationerna större än i övrigt.

Ett momentant högt tryck kan via en spricka eller otät fog i en vägg eller botten sprida sig över en större yta av väggens baksida (undersida) om denna inte är tillräckligt bra dränerad. Ögonblicket därefter när trycket på vattensidan har sjunkit medan trycket på baksidan fortfarande är högt kan delar av vägg eller botten förskjutas, lyftas eller utsättas för vibrationer. Denna brottmekanism är viktig för mer eller mindre täta begränsningsytor i vattenvägar, t ex ytor av berg eller betong och ställer krav på att installerade förankringar förblir effektiva även efter lång tid.

Om trycket momentant tillåts sjunka under vattnets ångtryck invid en begränsningsyta av en vattenväg kan dessutom kavitationsskador uppkomma. Risken för kavitationsskador ökar vid höga vattenhastigheter omedelbart intill en begränsningsyta, vid låga medeltryck och vid oregelbundenheter i ytans geometri.

Riskerna för kavitation och lyftning på grund av undertryck ökar som regel med stigande tappning både på grund av ökande strömningshastigheter och på grund av att spontan luftning av vattenströmmen genom luftmedrivning från atmosfären kan utebli på partier som vid lägre tappning skyddas av luftens dämpande inverkan.

Det finns flera områden som är särskilt utsatta för risker för kavitation och/eller lyftning. Det är dels själva tröskeln i närheten av krön och eventuellt luckanslag där tunna gränsskikt och centrifugalkrafter ofta förekommer och dels områden med höga vattenhastigheter, särskilt vid fogar, andra oregelbundenheter och brytpunkter i geometrin. Speciellt utsatta är också områden där energiomvandling sker. Här kan både den hydrauliska funktionen i sig och stabiliteten hos botten och väggar behöva kontrolleras om bristande funktion eller skador inte kan accepteras säkerhetsmässigt.

Kavitation är till sin natur en accelererande process när skador väl börjat uppträda. I ogynnsamma fall kan därför säkerhetsmässigt oacceptabla skador på betongkonstruktioner uppträda mycket snabbt, inom några få dagar med hög tappning, speciellt om skador uppstått tidigare och lämnats utan åtgärd eller reparerats på ett sätt som inte tål höga tappningar. Det innebär särskilda krav på gott underhåll av vattenvägarnas ytor där det förekommer strömningshastigheter på 20–30 m/s eller mer.

Flödeskommittens dimensionerande flödessekvens medför ofta krav på säker funktion hos utskoven under relativt långa perioder utan möjlighet till reparationer. Utskoven är inte sällan konstruerade och underhållna utifrån föreställningen att större tappningar endast skulle komma att behövas under kort tid. Det gäller i princip alla typer av utskov. Det är

dessutom inte ovanligt att anslutande delar, t ex energiomvandlare, är dimensionerade för ett lägre flöde än själva utskoven. Tekniska dimensioneringskriteria för utskov och energiomvandlare har överhuvudtaget utvecklats en hel del under de senaste decennierna. Dynamiska laster på vattenvägar där höga strömningshastigheter förekommer växer snabbt med tilltagande tappning och problemfri funktion vid måttliga tappningar kan inte utan vidare extrapoleras till höga tappningar. Det är i själva verket troligt att många skador på svenska utskov inträffat under mycket kort tid med relativt hög tappning.

Spontan eller artificiell luftning av vattenströmmen är en bra metod att skydda konstruktioner mot kavitationsskador. Enligt Peterkas klassiska försök krävs en lufthalt av 6–8% i vattenströmmen omedelbart invid den yta som skall skyddas, men mer moderna undersökningar visar att det knappast finns en skarp gräns - skyddet förbättras successivt när lufthalten stiger.

Spontan inblandning av luft i större omfattning sker i en fri vattenström om turbulensnivån är tillräckligt hög i kontaktytan med luften. Det är fallet där det turbulenta gränsskiktet vuxit så att det når vattenytan under förutsättning att vattenhastigheten är någorlunda hög, säg 5 m/s eller mer. Även i fritt fallande vatten sker ofta kraftig luftinblandning. Vid vattensprång sker alltid luftinblandning vid täckvalsen.

Luftinblandning har emellertid även andra effekter. Exempelvis kan den luftade vattenstrålen svälla i sådan omfattning att översvämningar uppstår lokalt.

Erosionsrisker bör inte bara beaktas för utskovens vattenvägar, utan även för själva älvfåran om indirekta effekter av sådan erosion kan äventyra säkerhetsmässigt väsentliga funktioner. Förändrade nedströmsvattenstånd kan t ex leda till omfattande effekter på strömningen och risker för erosion i en utsatt dammtå, t ex på grund av utebliven energiomvandling.

Dimensionerande flöden enligt riktlinjerna antas ju ha en återkomsttid överstigande 10 000 år. Det kan vara tveksamt om dagens älvfåror är stabila för flöden av denna storleksordning. Om t ex energiomvandlingen eller strömningsförhållandena i utskovet är beroende av att älvens avbördningskurva förblir gällande kan erosionsskydd behövas inom ett närområde. Detta ges sådan utsträckning att bakåtgripande erosion inte direkt eller indirekt kan skada dammen eller andra vitala delar allvarligt under ett högflöde.

Jorddammars anslutning till ytutskov kräver uppmärksamhet på grund av riskerna för erosion vid höga tappningar och höga vattenstånd.

Beträffande dammsäkerhetsmässiga begränsningar i övrigt på användbarheten av olika ytutskov hänvisas till avsnitt 2.1. ovan.

2.3. Bottenutskov

En mängd olika typer av bottenutskov förekommer, ofta med betydande individuella variationer i utformning. Utskoven används på många anläggningar ganska sällan och strömningsförhållandena kan ibland vara komplicerade. Detta innebär ofta en sämre precision i uppskattningar av avbördningskapaciteten i jämförelse med ytutskov.

En del bottenutskov är avsedda enbart för tappning vid låga vattennivåer uppströms, t ex i och med avsänkning av magasin och det är väsentligt att denna begränsning dokumenteras väl.

En avgörande faktor för den hydrauliska kapaciteten är om avbördningen styrs genom indämning från nedströmssidan eller om en bestämmande sektion finns. För vissa typer av schaktutskov ändras läget av den bestämmande sektionen eller graden av indämning med varierande vattenstånd.

Ibland förses den bestämmande sektionen med en diffusor för tryckåtervinning vilket innebär att undertryck kan uppträda. Kavitationsrisk kan då finnas och ibland installeras särskilda luftningssystem för att motverka eventuella kavitationsskador. Eftersom trycket i den bestämmande sektionen styr avbördningen, kan sådana luftsystem påverka avbördningsförmågan hos utskoven. I princip sjunker avbördningen om alltför mycket luft tillförs. På motsvarande sätt kan den hydrauliska avbördningsförmågan kanske ökas något genom att luftsystemet tillfälligt stängs av, men detta sker då till priset av ökad risk för kavitation och i värsta fall allvarliga skador. Blockering av lufttillförseln kan sålunda vara en händelse med allvarliga dammsäkerhetsmässiga följder.

Med tanke på att höga vattenhastigheter ofta förekommer i bottenutskov är riskerna för kavitationsskador i vattenvägar och vibrationer i t ex luckor vanligen större än i ytutskov. Risken för lyftning eller större förskjutning av vattenvägens väggar är dock som regel mindre på grund av fixering och ramverkan hos den slutna tvärsektionen.

Kapacitet och funktion hos anordningar för energiomvandling är ofta avgörande för att den hydrauliska avbördningsförmågan hos bottenutskov skall kunna utnyttjas.

Speciellt svåra att bedöma är bottenutskov med rörströmning och mer omfattande luftinblandning. Det gäller t ex utskov som har strömning med fri vattenyta vid höga eller måttliga hastigheter övergående till rörströmning i en nedströms belägen del av vattenvägen. Orsaken är fenomen sammanhängande med tvåfasströmning av luft och vatten i slutna ledningar. Luft som blandats in i en vattenström stiger uppåt och strävar att återgå till atmosfären på grund av sin ringa täthet. Framförallt där bubblornas transportväg till en fri vattenyta är av någon betydelse kan luftavgivningen innebära problem och begränsningar i avbördningsförmågan. Under sin väg genom vattnet samlas små luftbubblor till större bubblor som har högre stighastighet. Bubblorna kan nå sådana dimensioner att avbördningen blir starkt pulserande och när en bubbla når atmosfären kan tonvis med vatten lyftas högt i luften. Sådana momentana "gejserutbrott" innebär dels risker för personer som vistas i området och dels skaderisker för luckor, betongkonstruktioner och bergtunnlar genom uppkommande tryckstötar.

Karaktären av luftinblandning och luftavgivning kan vara helt artskilda vid olika stor avbördning i ett utskov, t ex kan luftavgivningen (och problemen) flyttas från intag till utlopp och anta helt ny skepnad. Erfarenheter från normala tappningar kan således inte utan vidare extrapoleras till högre avbördningar eller till avbördning vid andra vattenståndsförhållanden.

Eventuella dammsäkerhetsmässiga begränsningar i utnyttjandet av kapaciteten på bottenutskov kräver som regel en särskild granskning på grund av risken för blockering av rasmassor eller flytgods (sjunkgods) med hänsyn till att vattenvägarnas fria tvärmått ofta är ganska begränsade.

2.4. Praktiska erfarenheter

2.4.1. Provtappningar

Vid de anläggningar där avbördningskurvor är framtagna genom modellförsök har syftet med provtappningarna inte primärt varit att verifiera avbördningskapaciteten. För dessa anläggningar har provtappningar utförts för att kontrollera att utskoven kan öppnas utan risk för besvärande erosion, översvämningar, etc. Frågan om avbördningskapaciteten har i vissa fall kommit upp efter provtappningen, t ex för Suorvas bottenutskov där en provtappning genomfördes 1989 för att kontrollera att utskoven kunde öppnas för fullt.

Vid de provtappningar där flödesbestämning ingått som en väsentlig del slås man av de svårigheter man haft dels att genomföra mätningen, dels att få en acceptabel noggrannhet. Slutsatsen är att de traditionella metoderna för flödesbestämning i fält behöver ersättas med nya och bättre metoder.

I flera anläggningar har aldrig full utskovstappning provats. Praxis har varit att välja utskovens dimensioner efter den dimensionerande vattenföringen, medan filosofin tycks ha varit att utskov och övriga vattenvägar ofta inte dimensionerats för skadefrihet vid full utskovstappning. Man tar kostnaden för skadan när och om den inträffar, men förutsätter, utan särskild utredning, att skadan inte skall ha dammsäkerhetsmässig betydelse.

Denna filosofi är problematisk, speciellt för utskov med större fallhöjd. Man bör normalt kräva att provtappning åtminstone kan ske till full kapacitet för ett utskov i taget. Motivet är förstås att provtappningar avslöjar oförutsedda svagheter, som om de inte avslöjas och åtgärdas kan ställa till allvarliga problem vid den tidpunkt då man behöver utnyttja den maximala avbördningsförmågan. Undantag måste emellertid tillåtas i speciella fall, exempelvis om skadorna längs älven skulle bli omfattande. Det är angeläget att andra tillgängliga metoder för analys av dammsäkerhetsmässiga effekter utnyttjas på bästa sätt för anläggningar som inte kan testas till full kapacitet eller under relevanta förhållanden i övrigt.

För framtida provtappningar bör man vara medveten om behovet av en noggrann dokumentering av syftet, genomförande och resultat av provtappningen. Det skall vara provledarens ansvar att denna dokumentation kommer till stånd.

I september 1989 utfördes en mycket intressant provtappning med flodutskovet i **Trängslet** i Österdalälven i avsikt att studera vattenvägarnas funktion vid höga tappningar. Största tidigare verkställda tappning torde ha varit omkring 300 m^3/s medan Flödeskommittens riktlinjer pekar på en dimensionerande tappning på något mer än 1000 m^3/s.

Vid provet parallellkördes de två segmentluckorna i flodutskovet, som är ett ytutskov beläget omedelbart intill den 125 m höga stenfyllnadsdammens vänstra anfang. Största tappning under provet var 550–600 m^3/s. Kraftstationen var avstängd under hela försöket. Vattenföringen bestämdes enligt teoretiskt beräknade tabeller för delvis öppna utskov. En kontroll av vattenföringen gjordes genom volymberäkning i nedanför liggande magasin vid Åsens kraftverk.

En detaljerad redogörelse för provtappningen återfinns i **bilaga 1A**. En diskussion av olika hydrauliska kapacitetsbestämningar för utskovet i fråga genomförs i **bilaga 1B**.

Dammsäkerhetsmässigt väsentliga resultat och slutsatser av provtappningen kan sammanfattas som följer:

- risk för erosionsskador på dammen föreligger vid tappningar över ca 600 m^3/s i utskovet, i första hand uppströms intaget där bättre erosionsskydd krävs men även vid dammtån där erosionsskydd bör övervägas

- tillfartsvägen till anläggningen blir oframkomlig vid tappningar över 500–600 m^3/s genom översvämningar och erosion

- utskovets angivna hydrauliska avbördningskapacitet kan ifrågasättas

- utskovets tekniska kapacitet kan inte sättas högre än ca 600 m^3/s för närvarande

Dessutom påvisades risker för dammsäkerhetsmässigt mindre allvarliga, men ekonomiskt kännbara skador vid höga tappningar. Andra delar av anläggningens vattenvägar som i förväg ifrågasatts visade sig däremot fungera tillfredsställande.

Provtappningen har uppenbarligen haft avgörande betydelse. Det bör dock observeras att tappning kunde ske endast till drygt halva den dimensionerande tappningen.

Provtappningen i Trängslet följdes upp år 1990 med fysiska modellförsök i skala 1:40. Avsikten med dessa försök var att noggrannare bestämma den hydrauliska avbördningskapaciteten samt studera lämplig utformning av erosionsskydd för dammslänten uppströms utskovet. I avsnitt 3.2.3. nedan beskrivs resultatet av en matematisk modellering som nu utförts för samma utskov. Där jämförs och diskuteras dessutom de olika hydrauliska kapacitetsbestämningar som utförts för utskovet.

I **bilaga 2** redovisas utförande och resultat av ett antal ytterligare provtappningar som gjorts vid svenska dammar under senare år. Motivet för proven har varierat. I några fall har man varit ute efter att närmare bestämma den hydrauliska kapaciteten. I andra fall har man särskilt inriktat sig på att finna eventuella tekniska begränsningar i utskovens användbarhet.

2.4.2. Andra erfarenheter

Två fall som visar på svårigheterna att med handformler och teoretiska beräkningar få korrekt avbördningsförmåga är Midskog bottenutskov och Sikfors ytutskov. I båda fallen är jämförelsen gjord mot modellförsök.

Vid modellförsök som utfördes i skala 1:50 av Midskog kraftstation i samband med en renovering fann man att de existerande avbördningskurvorna för ytutskoven stämde någorlunda, modellförsöken gav 7% lägre kapacitet. För bottenutskovet däremot fann man att avbördningsförmågan vid dämningsgräns var 750 m^3/s mot antagna 560 m^3/s, en avvikelse på 34 %. Orsaken till denna felräkning av avbördningförmågan är inte utredd men visar på behovet av en genomgång av anläggningarnas utskovskapacitet. I detta fall var kapaciteten högre än den beräknade, om förhållandet inte avslöjats kanske krav ställts på ytterligare "onödig" avbördningsförmåga.

De först beräknade avbördningskurvorna för en sektorlucka och två segmentluckor i Sikfors innebar en kapacitet vid dämningsgräns på 320 m^3/s respektive 2 x 475 m^3/s. Modellförsöken i skala 1:40 visade en utskovskapacitet på 290 m^3/s för sektorutskovet och 2 x 390 m^3/s för segmentutskovet. Beräkningen överskattade alltså utskovskapaciteten med 10% respektive 22%.

3. METODER ATT BESTÄMMA AVBÖRDNINGSKAPACITET

3.1. Teoretiska beräkningar

Den klassiska metoden för att bestämma utskovs hydrauliska avbördningskapacitet är med olika handformler och teoretiska beräkningar på basis av bl a Bernoullis teorem och systematiserade erfarenhetsdata från fysiska modeller och provtappningar i utförda anläggningar.

Graden av framgång, dvs resultatets riktighet, beror huvudsakligen på tre faktorer:

- det aktuella utskovets typ, geometri och strömningsförhållanden,
- tillgången på relevant, systematiserat erfarenhetsmaterial,
- utredarens kunskap, förståelse och ambitionsnivå

Dessa faktorer är inte oberoende av varandra. Man kan t ex allmänt säga att för ytutskov föreligger ett bättre referensmaterial än för bottenutskov i huvudsak beroende på att fler ytutskov byggts och att standardisering av formerna drivits längre. Av samma skäl är många ingenjörers förståelse av strömningsförloppet bättre för ytutskov än för bottenutskov.

Utgångspunkten vid teoretisk beräkning av avbördningskapacitet är som regel en jämförelse mellan aktuell utskovströskels vertikalsektion och andra tröskelsektioner, vars avbördningsförmåga tidigare undersökts. Jämförelsematerial finns både från svenska och utländska anläggningar, huvudsakligen baserat på fysiska modellförsök. Det svenska materialet finns tyvärr inte sammanställt, bearbetat och publicerat för allmänt bruk. Däremot finns material tillgängligt i sådan form från andra länder, t ex US Corps of Engineers [1], från International Association for Hydraulic Research [2] och från Norsk Hydroteknisk Laboratorium [3]. Svenska utskovströsklar är ofta mer konservativa, dvs lägre och/eller flackare, än vad som är vanligt internationellt och tillgång till svenskt referensmaterial är därför av stort värde.

Avbördningskapaciteten på ett utskov påverkas i väsentlig grad av uppträdande sidokontraktion. Form på pelare, pelarnosar, gåtbalkar mm och deras placering i relation till den bestämmande sektionen samt anslutningen i sida mellan utskov och tilloppskanal eller damm är sålunda av stor betydelse. Dessa faktorer behandlas ofta schablonmässigt.

Få utskov har konstant avbördningskoeffecient vid varierande vattenstånd. Sidokontraktionen tenderar att sänka avbördningskoeffecienten med stigande tappning medan en god tröskelform med utpräglad vertikal kurvatur ger motsatt effekt så länge vattenströmmen följer skibordet; det sker dock till priset av lägre tryck mot tröskeln, varför kavitationsrisken kan behöva beaktas.

Även inströmningsförhållandena i övrigt påverkar avbördningskapaciteten. Det gäller naturligtvis om fallförluster finns i tilloppet mellan aktuell referenspegel och utskovet men även hastighetsfördelningen och riktningen på det tillströmmande vattnet har stor betydelse.

De största avvikelserna från den avbördningsförmåga, som kan beräknas utifrån de faktorer som diskuterats ovan, erhålles oftast på grund av indämning från annan, konkurrerande bestämmande sektion belägen på nedströmssidan om utskovet eller på uppströmssidan mellan utskov och referenspegel. Motsvarande effekt kan fås av för lågt placerad brobana eller lucka som inte kan lyftas tillräckligt. Det bör noteras att den normala driften inte alltid ger indikationer om att indämning kan uppträda vid mycket höga vattenföringar.

I sin enklaste form ger teoretisk beräkning med handformler endast en avbördningskurva som resultat. Metoden ger då endast utskovets hydrauliska kapacitet utan hänsyn till tekniska begränsningar av olika slag. Normalt går man ett eller flera steg längre och bestämmer vattenytans läge (eller trycket) i olika delar av vattenvägen. Dessutom uppskattas uppträdande vattenhastigheter och sammanhängande risker för erosion eller kavitation. Även omfattning och karaktär av eventuell luftinblandning i vattenströmmen och effekter härav kan inom vissa gränser beräknas eller bedömas.

Vid höga vattenhastigheter och strömlinjer som är krökta i horisontalplanet förblir vattenytan inte längre horisontell i snitt som är vinkelräta mot strömningen. En noggrann handberäkning blir då komplicerad och trots detta mindre exakt. Man har då nått en punkt där övergång till mer omfattande matematisk eller fysisk modellering kan övervägas.

Noggrannheten i utskovs hydrauliska avbördningsförmåga beräknad teoretiskt med hjälp av handformler kan i gynnsamma fall, t ex för ytutskov med standardiserad form och bra inströmning, vara bättre än ± 3 % (standardavvikelse). Oftast finns emellertid någon eller några komplicerande faktorer, vilket gör att man praktiskt hamnar i registret ± 5 à 8 %. Vid direkt svårbedömda förhållanden kan felet bli betydligt större.

3.2. Matematisk modellering

3.2.1. Allmänt

Matematisk modellering innebär att en bild av strömningsförloppet skapas genom att man med hjälp av datorer numeriskt löser styrande differentialekvationer i lämplig form, vanligen St Venants eller Navier-Stokes' ekvationer. Lösning sker med finita differens- eller finita element- formuleringar. Modelleringen kan utföras i en, två eller tre dimensioner och avse såväl stationära som instationära förlopp.

Endimensionell matematisk modellering av stationära strömningsförlopp utförs regelmässigt med relativt enkla datorprogram, som t ex HEC-2. För instationära strömningsförlopp som huvudsakligen är endimensionella används t ex MIKE 11 och DAMBRK.

Vid modellering i två eller tre dimensioner av såväl stationära som instationära förlopp kommer andra, mer generella program till användning som utvecklats för strömning av värme och vätskor, exempelvis PHOENICS och FLUENT.

Flera av programmen kan dessutom hantera erosion och materialtransport under strömningsförloppet.

Valet av modell avgörs naturligtvis av det aktuella problemets natur, t ex graden av inverkan på skeendet av olika fysiska dimensioner och tidsberoendet.

Strömning genom utskov är som regel att betrakta som tredimensionella förlopp, men ibland kan även tvådimensionella ansatser vara brukbara. En kombination av två- och tredimensionell beskrivning kan ofta användas med fördel.

Definitionen av **stationär** strömning innebär att tidsmedelvärdet av vattenhastigheter, vattendjup och flöde inte ändras. I verkligheten sker all vattenströmning med transienta inslag i form av virvelbildning, fluktuerande strömningshastigheter mm. Graden av inverkan av dessa faktorer är emellertid olika. Vi har i många fall vant oss vid att beräkna förloppen approximativt genom förenklade antaganden utgående från tidsmedelvärden av aktuella parametrar. I en del situationer är emellertid variationerna i sig nog så intressanta t ex därför att påverkan på luckor eller vattenvägens väggar kan beskrivas bättre.

Vid numerisk lösning av de stationära strömningsekvationerna för situationer med väsentliga transienta inslag (t ex virvelbildning) kan instabiliteten bli sådan att en stabil lösning blir svår att finna.

Matematisk modellering av strömning med fri vattenyta är väsentligt mer krävande än modellering av rörströmning eftersom gränsytans läge inte kan förutsägas exakt och dessutom varierar i tiden.

Numerisk lösning av differentialekvationer över stora fält är en vetenskap i sig. Som allmän regel gäller att indelningen bör vara fin nog att beskriva fältets gränser och förekommande gradienter med tillräcklig upplösning. Vid instationära formuleringar bör indelningen dessutom vara finare än ca en tiondel av den minsta våglängd i förloppet som man önskar studera. Dessutom måste tidssteget väljs i relation härtill; ju finare indelning ju kortare tidssteg. Vanligt är att tidssteget väljs mellan 0,01 och 2 sekunder.

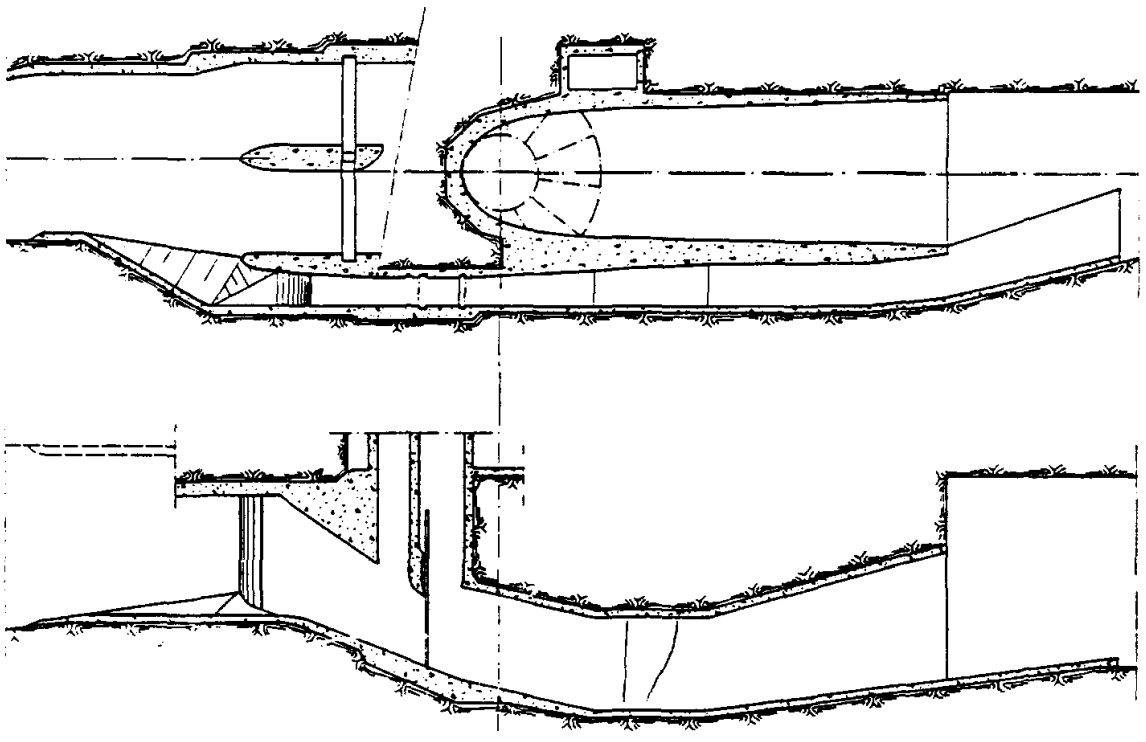
Det är (borde vara) normalt att utföra modellering med vissa variationer i diskretisering och andra väsentliga parametrar för att verifiera den erhållna lösningens stabilitet och relevans. Tolkning och värdering av resultaten är nödvändigt med hänsyn till att de lösningsmetoder som står till buds kan innebära såväl numerisk dämpning som förstärkning av instabiliteter i strömningen.

De beräkningar som redovisas nedan visar att matematiska modeller är ett användbart instrument för att bedöma utskovs hydrauliska och tekniska avbördningskapacitet. Emellertid ställer uppbyggnad av modellerna och tolkning av resultaten höga krav på förståelse både av de hydrauliska förloppen och de numeriska lösningsmetoderna.

Beräkningar med fri vattenyta kan utföras idag för vissa situationer men det krävs viss ytterligare utveckling innan matematiska modeller här kan anses vara en fullt operationell metod.

3.2.2. Bottenutskov vid Holmens kraftverk

I Holmens kraftverk finns ett bottenutskov, vars huvudsakliga funktion är tappning av turbinvattenföringen efter frånslag i stationen. För att tillräcklig avbördningskapacitet skall erhållas med minsta möjliga utskovsöppning och lucka strömmar vattnet genom en diffusor innan det leds till kraftverkets utloppstunnel, se figur 1.

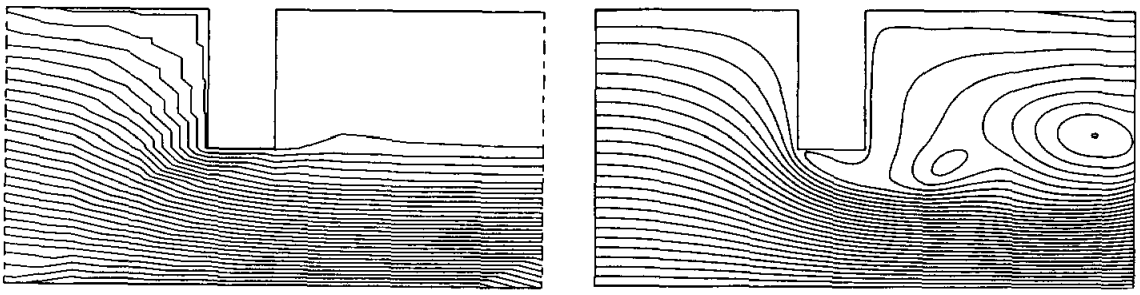


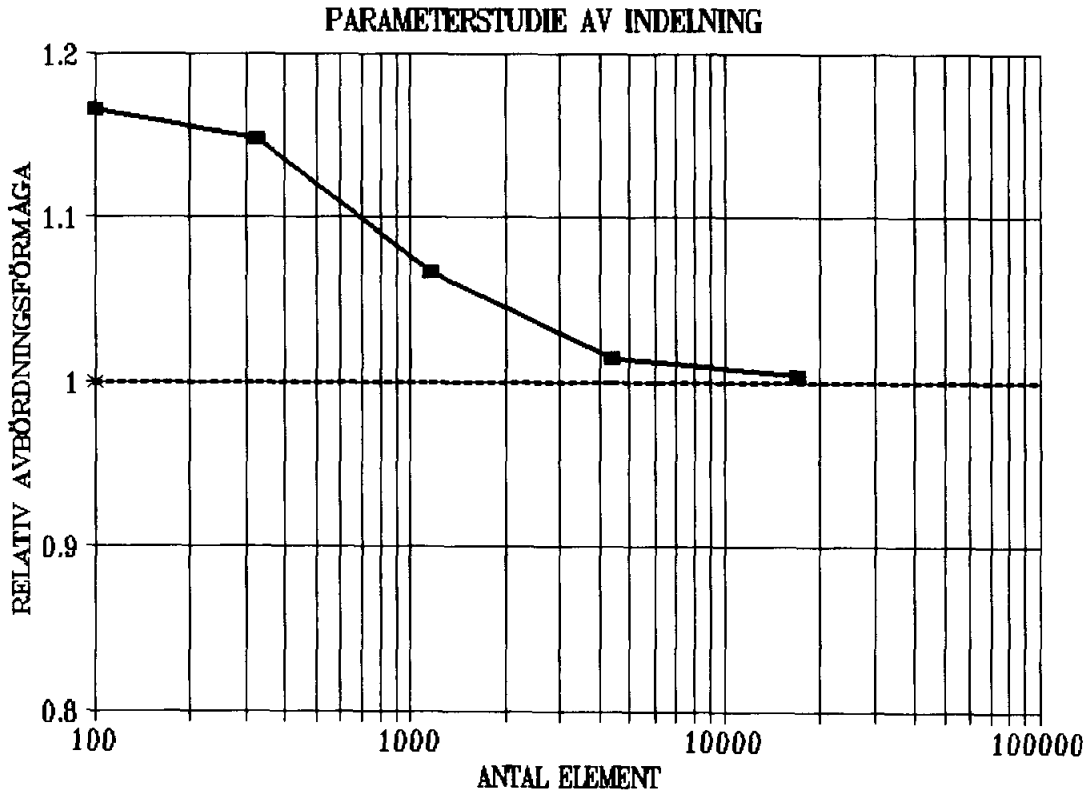
Figur 1. Bottenutskov vid Holmens kraftverk.

Den utförda matematiska modelleringen av utskovet [4], omfattar tvådimensionella modeller, såväl stationära som transienta, och en tredimensionell stationär modell. Modellerna har utnyttjats för att optimera utformningen av vattenvägarna hydrauliskt. Samtliga modeller använder datorprogrammet FLUENT. Efter den matematiska modelleringen gjordes en fysisk modell i skala 1:40 av anläggningen för verifiering av resultaten från den matematiska modelleringen.

Överensstämmelsen var god mellan de matematiska modellerna och den fysiska modellen vid avbördning med helt öppen lucka; avvikelserna i avbördningskapacitet var mindre än 3 %.

En parameterstudie av inverkan av indelningens finhet gjordes för den 2-dimensionella modellen med delvis öppen lucka. Som framgår av figur 2 har indelningen avgörande betydelse.





Figur 2. Parameterstudie av indelningens betydelse.

3.2.3. Ytutskov i Trängslet

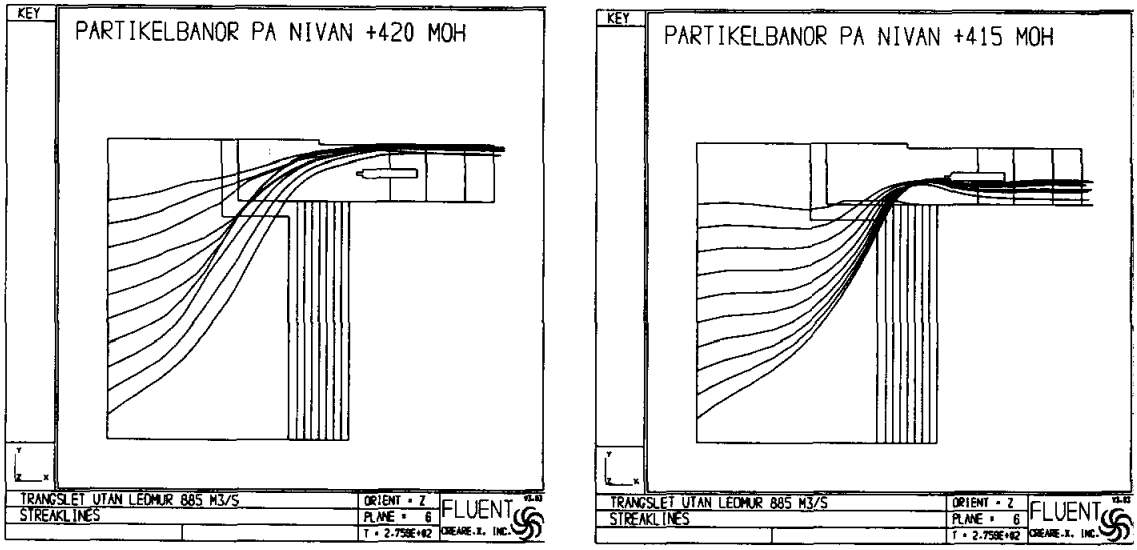
I syfte att ytterligare undersöka tillämpligheten av matematiska modeller har utskovet i Trängslet modellerats. För detta utskov har som ovan redovisats dessutom utförts provtappning i fält, fysisk modellering och teoretisk beräkning av utskovskapaciteten.

Den matematiska modelleringen [5] har gjorts med programmet FLUENT. Det modellerade området innefattar förutom själva utskovspartiet en mindre del av utloppskanalen och ett parti om ca 120 x 100 m uppströms därom med tilloppskanalen till utskovet och en del av magasinet begränsat av dammslänten till höger om utskovet och stranden till vänster om utskovet.

Beräkningen har gjorts med en 3-dimensionell instationär ansats som beskriver strömning av såväl luft som vatten. Laminär gränsskiktsutveckling förutsattes primärt.

Beräkningen avser avbördning med helt öppna luckor och en föreskriven avbördning av 885 m^3/s. Magasinsvattenståndet beräknades till ca 423,20 m.

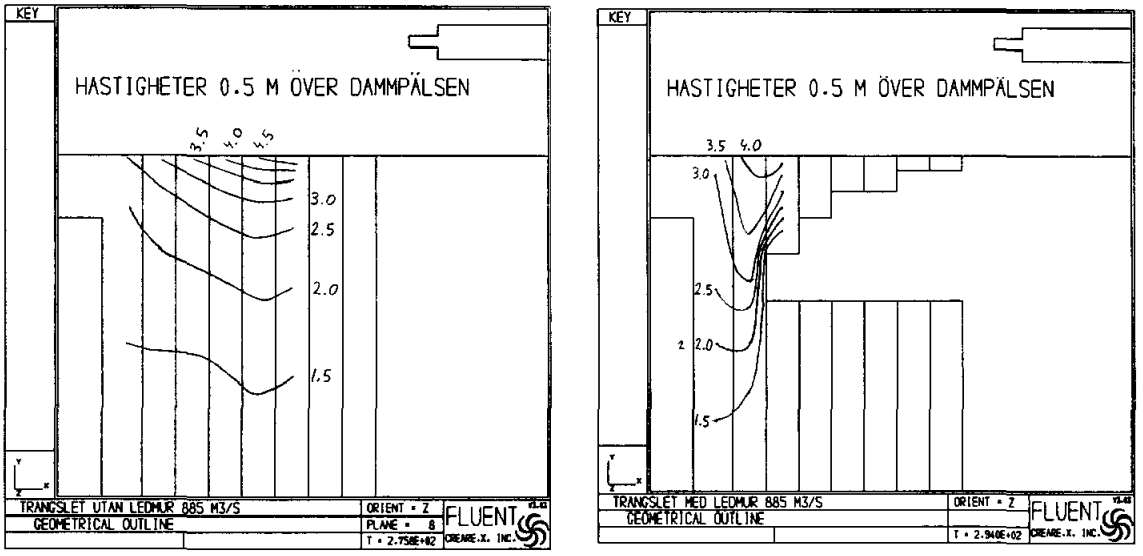
Strömbilden framgår av figur 3 som visar trajektorier (strömbanor) för partiklar som införs i vattnet på olika nivåer. Vattnet utför en korkskruvsrörelse innebärande att ytvatten i första hand passerar genom den vänstra utskovsöppningen och bottenvatten genom den högra.



Figur 3. Flodutskov i Trängslet. Utan ledmur. Partikeltrajektorier på olika nivåer.

En andra beräkning gjordes med en föreslagen ledmur på plats till höger om utskovet. Vattenståndet i magasinet sjönk då till 423,05 m, vilket väl motsvarar den förändring som registrerades i den fysiska modellen. Dessutom ändrades fördelningen av flödet mellan utskovsöppningarna från ca 54 % i vänster öppning och 46 % i höger till 52 % resp. 48 % i den matematiska modellen. Så små förändringar kunde rent tekniskt inte mätas i den fysiska modellen.

Beräknade vattenhastigheter 0,5 m över botten redovisas i figur 4 nedan för anslutningspartiet mellan jorddammen och tilloppskanalen till utskovet. Maximala hastigheter och utsträckning av höga hastigheter överensstämmer relativt väl med motsvarande mätningar i den fysiska modellen. Största hastighet är i båda fallen ca 4,5 m/s före murens tillkomst. Med ledmuren på plats sjunker hastigheterna över dammslänten.



Figur 4. Flodutskov i Trängslet. Detalj. Vattenhastigheter vid jorddammsanslutning, utan resp. med ledmur.

En kontrollberäkning med turbulent hastighetsfördelning pekade på att den antagna laminära hastighetsfördelningen innebär ett fel av högst 2 % på avbördningskapaciteten.

Utskovens hydrauliska avbördningskapacitet vid dämningsgränsen bestämd med olika metoder redovisas i bilaga 1B. Jämförelsen pekar på att den **hydrauliska** avbördningsförmågan var minst 860 m^3/s och troligen 875 m^3/s innan ledmurens tillkomst. Fysiska modellförsök var i detta fall den noggrannaste metoden att bestämma kapaciteten.

3.2.4. Utskov vid Mellanfallet, Älvkarleby kraftverk

Även för ett av utskoven i Mellanfallet vid Älvkarleby kraftverk i Dalälven har en matematisk modell [6] upprättats. Mellanfallsdammen är en betongdamm med sex utskovsluckor. Dammen byggdes under slutet av 80-talet.

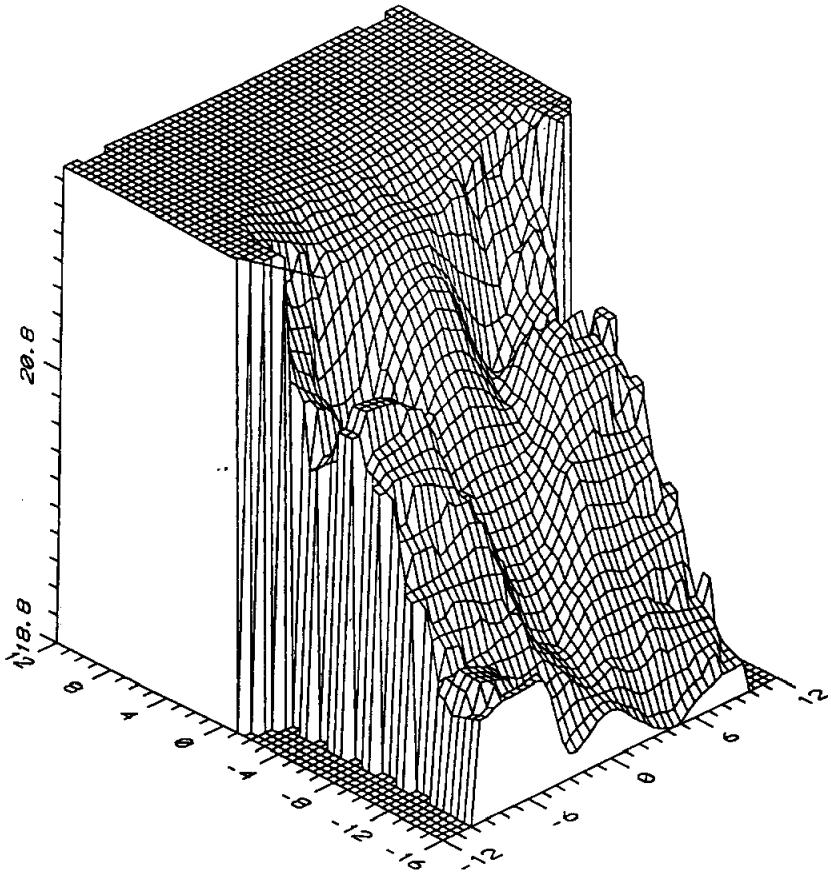
Utskovets bredd i Mellanfallet är 10 m och tröskeln ligger på +18,5 m. Dämningsgränsen ligger på +22,5 m och botten uppströms utskoven ligger på nivån +17 till +18 m, d v s det är relativt grunt vatten uppströms. Även nedströms utskoven är terrängen flack men någon risk för indämning finns inte.

För uppbyggnad av den matematiska modellen har programmet PHOENICS använts. Det är ett generellt programpaket för t ex strömning i vätskor.

Kravet på modellområdets storlek är lika för både en matematisk och en fysisk modell. För den matematiska modellen av Mellanfallet sträcker sig det modellerade området 125 m uppström dammen till ca 10 m nedströms. Modellområdet är i beräkningen indelat i ett 35 x 21 celler stort gridnät i horisontalplanet och med 20 celler i vertikalled varav 3 celler ligger i luften ovanför den preliminärt antagna vattenytan.

Turbulensmodellering har skett genom en ansats av konstant kinematisk viskositet. Friktionsmotståndet har modellerats genom en motståndskoefficient Cd.

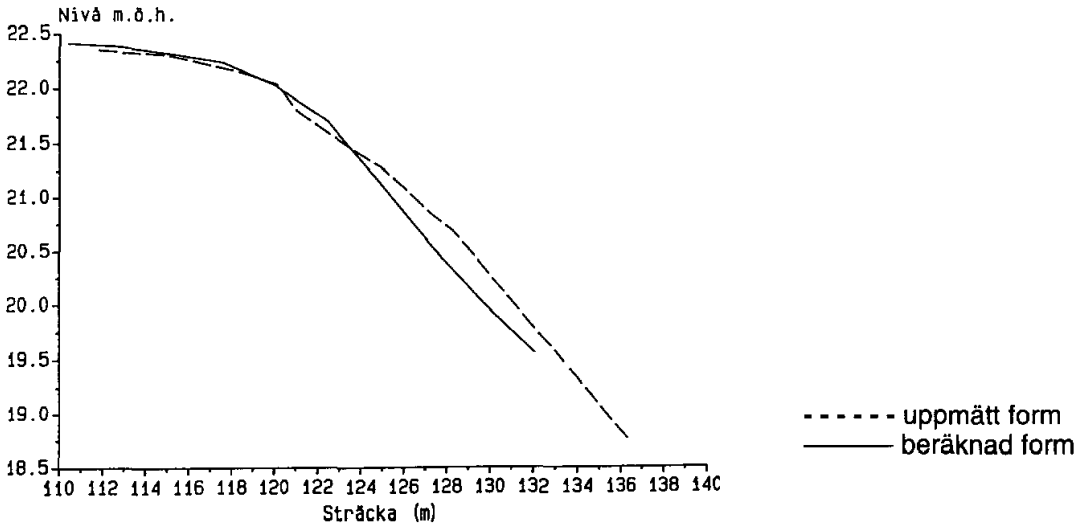
En fysisk modell i skala 1:40 har använts vid verifieringen av den matematiska modellen. Vattenståndet har mätts med en spetsmätare med nonieskala i utskovets närområde och mellan utskovspelarna vilket har gett en 3-D bild av vattenytans form, se figur 5.



Figur 5. Älvkarleby kraftverk, utskov i Mellanfallet. 3-D bild av uppmätt vattenyta i utskovet. Vattenföring 125 m³/s.

Den matematiska modelleringen i 3-D visade sig svår. Vattenståndet uppströms konvergerar till en början mot det sanna värdet med acceptabel hastighet men hastigheten avtar och vattenståndet når inte det sanna värdet inom rimliga beräkningstider. Beräkningarna har utförts på en DEC-station 5000 dator.

Även om inte vattenståndet kunnat beräknas korrekt kan den beräknade vattenytans form jämföras med den uppmätta. I figur 6 visas att vattenytans form längs ett längdsnitt i utskovets centrumlinje för den fysiska respektive matematiska modellen stämmer relativt väl överens.



Figur 6. Älvkarleby kraftverk, utskov i Mellanfallet. Vattenytans form i ett längdsnitt genom mitten av utskovet.

Med samma metod har vattenytans form beräknats för ett 2-D fall där man ser på ett vertikalt längsgående snitt genom ett utskov. Här visade det sig att vattenståndet konvergerar relativt lätt till den sanna lösningen. Felet i flödesbestämningen är mindre än ±1 %.

Slutsatsen blir att 2-D matematisk modellering i PHOENICS med turbulensmodellering med konstant kinematisk viskositet fungerar. Motsvarande för 3-D är i dagens läge inte användbart. Under de senare åren har ett antal fysiska modellförsök utförts för ombyggnad av flottningsutskov. Dessa utskov får ofta en ogynnsam utformning av krönet och en 2-D modell kan där vara till nytta för att dels förbättra designen inom de givna ramarna dels bestämma den hydrauliska avbördningsförmågan, men då utan hänsyn till kontraktion runt dammpelarna etc.

3.3. Fysiska modellförsök

3.3.1. Allmänt

Fysiska modellförsök är ett utomordentligt hjälpmedel vid den hydrauliska utformningen av utskovens vattenvägar. Trots stora framsteg med matematiska modeller och kraftfullare datorer löses många problem med fördel i en fysisk modell, i vissa fall är en fysisk modell enda möjligheten, tekniskt eller ekonomiskt, att lösa ett strömningstekniskt problem. En fysisk modell har också ett demonstrationsvärde, den ger en bild av den färdiga anläggningen och den avslöjar oförutsedda svagheter och fel i utformningen.

Den övervägande delen av alla modellförsök för utskov grundar sig på Froude's modellregler. Dessa grundar sig på dynamisk likformighet mellan modell och prototyp vilket innebär att förhållandet mellan verkande tröghets- och gravitationskrafter är lika i modell och prototyp. Viskösa krafter, ytspänningskrafter etc försummas. Det gäller att i första hand välja modellskala så att dessa krafter inte påverkar resultatet. I vissa fall har t ex ytspänning stor betydelse bl a för hur drivgods uppför sig och vid luftinblandning. I dessa fall måste man

vara medveten om dessa krafters inverkan vid utvärderingen av modellförsöken. Att välja en större skala för att eliminera inverkan är normalt inte gångbart.

Med Froude's modellregler kan flöde, hastighet, tid, tryck, krafter etc räknas om från modell till prototyp. För studium av speciella frågor kan andra modellregler komma ifråga, det gäller att analysera vilka krafter och processer som uppträder och utforma modellreglerna efter detta. Litteratur inom området finns av bl a M.S. Yalin [7] och P. Novak, J. Cabelka [8].

Noggrannheten i modellförsöken är knuten till modellskalan, ju större skala desto bättre noggrannhet. För att uppnå en acceptabel noggrannhet vid modellförsök måste två olika krav uppfyllas.

Det ena är vissa minimivärden på parametrar som, om de underskrids, betyder att skaleffekter får ett oacceptabelt stort inflytande. Dessa minimivärden är empiriska, för Reynolds tal (Re) anges värdet Re>2 000–3 000 i öppna vattenvägar och för rörströmning Re>12 000. För vattendjupet y anges värdet y>0,02 m, kanalbredd B värdet B>0,01 m, rördiameter D värdet D>0,01 m. Observera att detta är minimivärden som inte får underskridas, vid val av modellskala väljs skalan så att dessa parametrar blir betydligt större.

Det andra kravet när det gäller acceptabel noggrannhet är mätnoggrannhet av vattenstånd, måttnoggrannhet av utskov, lucköppningar etc. Som exempel på dessa parametrars noggrannhet kan nämnas att utskoven oftast byggs i plexiglas.

Tjockleken hos plexiglas kan variera med ca ±10% vilket ger ± 0,5 mm för den vanligen använda tjockleken. Inmätning av utskovströskel görs inom ±0,2–0,3 mm. Mätning av vattenstånd görs normalt med spetsmätare inom ±0,2 mm vilket innebär att t ex felet i H i formeln för ytutskovs avbördningsförmåga blir ±0,5 mm.

En lucka kan ha bredden B = 10 m och höjden H = 5 m. Med skalan 1:50 får vi modellmåtten B = 200 ± 1 mm och H = 100 ±0,5 mm. Noggrannheten i avbördningen beroende på dessa faktorer blir då ca 1%. För att få ett modellförsöks totala noggrannhet vid bestämning av avbördningskapacitet tillkommer andra faktorer som t ex flödesmätningen i modellen som bör ha en noggrannhet på ±0,5–1 % med moderna elektromagnetiska flödesmätare.

På detta sätt får man gå igenom punkt efter punkt och se på olika felkällor. Att ge ett generellt svar på vilken noggrannhet man normalt har vid bestämning av utskovskapacitet i modellen är inte meningsfullt, varje enskild modell måste värderas. En utmärkt sammanfattning om detta finns av P. A. Kolkman [9].

3.3.2. Hydraulisk avbördningskapacitet

Möjligheten att i modell noggrant bestämma ett utskovs hydrauliska avbördningsförmåga hänger samman med utformningen. Konstruktioner där avbördningsförmågan påverkas av friktionsmotståndet eller en viss utveckling av gränsskiktet riskerar att bli felaktigt modellerade. Konstruktioner där kavitation och luftsugande virvlar uppträder är också problematiskt att modellera i en vanlig Froude modell.

En tumregel säger att luftsugande virvlar blir relativt sett större i prototypen än i modellen. Luftsugande virvlar bör inte få uppträda i en prototyp. Noggrannheten i flödesbestämningen i en modell av ett bra utformat utskov bedöms vara bättre än 2–4% med beaktande av de kommentarer som givits i kapitel 3.3.1. Noggrannheten kan ökas men på bekostnad av priset för modellförsöken.

3.3.3. Teknisk avbördningskapacitet

De flesta av de faktorer som leder till att den hydrauliska utskovskapaciteten inte kan uppnås helt kan undersökas i fysiska modellförsök. Inverkan av höga vattenstånd och vågor modelleras rätt i en vanlig Froude modell. En varning finns för områden där man har en kraftig luftinblandning. I en Froude modell modelleras inte vattnets luftinnehåll korrekt. För att få en uppskattning av korrekt vattenstånd kan luftinblandningen i prototypen uppskattas med de formler som finns till hands. En hel del litteratur finns på området luftmedrivning, se t ex H. R. Sharma [10].

Även om det är problem att få korrekt kvantitativ modellering av vattnets luftinnehåll i en fysisk modell är en modell användbar för att få förståelse för fenomen som uppträder p g a luftmedrivningen och för kvalitativa studier.

Detta gäller även för fenomen som uppträder på grund av luftavgång från vatten där luft tidigare blandats in. Förenklat uttryckt bildas lika stora luftbubblor i modellen som i prototypen vilket medför att luftbubblornas stighastighet blir lika medan vattenhastigheten i modellen är lägre än i prototypen. Detta medför att i modeller där vattnet avluftas i t ex en tunnel når luften tunneltaket snabbare än i prototypen.

Icke stationära flödesförlopp (svallning) i slutna ledningar t ex tunnlar kan uppträda vid förändringar i utskovstappningen eller vid pulserande flöde på grund av luftproblem. Svallning i tunnlar modelleras korrekt i en vanlig Froude modell om svallningen sker mot fria vattenytor. Sker svallningen mot en instängd luftvolym stämmer inte längre Froudes modellregler, men med modifiering av den instängda luftvolymen kan det åter gå bra. Problemet är atmosfärstrycket som är lika stort i både modell och prototyp.

Man kan få problem med för stora fallförluster i modelltunneln, speciellt om tunneln i prototypen har en låg råhet (borrad tunnel). Orsaken är att vid modellens lägre Reynolds tal ökar friktionskoefficienten i allmänna friktionsformeln till ett högre värde än i prototypen även om modellen byggs i hydrauliskt glatt plexiglas. En enkel lösning är att bygga modellen i en större skala. Går inte detta av tekniska eller ekonomiska skäl, finns en annan möjlig utväg. Det som styr svallningen i en tunnel är tunnelns längd/areaförhållande. Man får helt enkelt öka tunnelarean och tunnellängden proportionellt till dess förlusterna blir korrekta medan man behåller modellskalan i resten av modellen.

Kavitation kan inte modelleras direkt i en vanlig Froude modell. Problemet är åter atmosfärstrycket. Exempel på modellförsök med kavitation är undersökningar av sughävertars kavitationsbenägenhet, vilket kan göras i en rigg där trycket kan sänkas. Man kan alternativt utgående från tryckmätningar i en vanlig modell göra en beräkningsmässig kompensation för det höga lufttrycket vid utvärdering av försöken.

Undersökning av drivgods görs med fördel i en modell. En dominerande anledning till att fysiska modeller byggdes under tiden fram till 70-talet var undersökning av timmerflottning förbi kraftstationerna. Drivgodsets uppträdande i modell påverkas i vissa avseenden av ytspänningen. Denna kan minskas genom ytspänningsnedsättande medel t ex diskmedel.

Erosion i vattenvägar, av vågor etc, kan antingen bestämmas direkt i en vanlig modell om erosionen sker i grovt friktionsmaterial eller genom mätning av vattenhastigheter och våghöjd i olika punkter och sedan beräkning av erforderlig stenstorlek för stabilitet.

Erosionsförlopp i berg är svårt att modellera. Ofta bestäms maximalt erosionsdjup genom att berget ersätts med grovt singel i modellen. Erosion i berg är ett intressant område med tanke på flera fall där berget brutits upp nära utskovens betongkonstruktion. En förstärkning med förankrad betong kan ibland vara nödvändig.

3.4. Provtappningar

Något generellt svar hur man skall bestämma avbördningsförmågan vid provtappningar finns inte eftersom förutsättningarna varierar från fall till fall. Det man kan säga är att flödet bör bestämmas nära utskoven för att reducera felet p g a magasinering mellan mätställe och utskov. Magasineringen beräknas som vattenytans stighastighet gånger den horisontella arean mellan utskov och mätställe. Stighastigheten bestäms genom noggrann mätning och registrering av vattenståndet i området. Mätstället bör också väljas så att det inte finns någon okontrollerbar till- eller avrinning mellan utskov och mätställe. Före en provtappning bör man göra en felanalys för att bl a fastställa den tid som utskoven måste vara öppna för att felet i magasineringskorrelationen inte skall bli för stort. Ju större horisontell area mellan utskov och mätställe desto längre tid måste mätningen pågå.

För att ge en bild av nödvändig tid för provtappning visas nedan ett exempel. Förutsättningen är att bidraget till felet i flödesbestämningen från magasineringen skall bli mindre än 1 %. Antag t ex att avståndet mellan utskov och den punkt där flödesmätning sker är 5 000 m och att älven i genomsnitt är 100 m bred. Detta ger en horisontell area $A=500\,000\ m^2$.

Nivåmätningen antas kunna göras med 1 cm noggrannhet. För att beräkna stighastigheten på vattenytan behövs två nivåmätningar vilket ger att felet dH i mätningen av nivåskillnaden kan bli 2 cm.

Antag vidare att flödet i provtappningen är 1 000 m^3/s vilket ger att magasineringen måste bestämmas med ett fel som är mindre än $dQ = 10\ m^3/s$. Frågan är nu hur lång tid T som provtappningen måste pågå för att bidraget till felet i flödesbestämningen från magasineringskorrektioner skall bli mindre än $dQ = 10\ m^3/s$. För dQ gäller sambandet $dQ = dH \cdot A/T$.

Vi antar att tiden T och horisontella arean A kan bestämmas med försumbart fel.

Med ovanstående värden på de ingående faktorerna får vi att T=1 000 sekunder eller 17 minuter.

En användbar flödesmätare är en närbelägen kraftstations turbiner. Kraftstationen kan ligga antingen uppströms eller nedströms utskoven. Noggrannheten i turbinernas flödesbestämning är som regel inom några % men beror på ålder och status. Det största felet i utskovens flödesbestämning kommer i detta fall antagligen inte från fel i turbinernas flödesmätning utan från magasinering och lokal tillrinning mellan utskov och kraftstation. I detta sammanhang oftast långt avstånd och stor horisontell area mellan utskov och mätställe gör att provtappningen måste pågå under lång tid för att nå acceptabel felnivå. Dessutom är utskovskapaciteten normalt alltid större än turbinernas maximala kapacitet så bestämning av maximal utskovskapacitet är inte möjlig om inte provet görs i etapper. Detta gör att provtiden förlängs ytterligare och för samma noggrannhet i bestämning av magasineringsflödet krävs mer spill.

Enbart tappning till eller från ett magasin, utan flödesmätning genom en kraftstation, kan sägas vara ett specialfall av ovanstående metod. Här blir volymsbestämningen i magasinet avgörande för noggrannheten i utskovskapaciteten.

En annan metod för flödesbestämning i öppna vattenvägar är genom akustisk flödesmätning. I Sverige görs mätningar med ett mätsystem från Accusonic men andra fabrikat finns också tillgängliga på marknaden. Mätningen görs genom att sändare/mottagare av ultraljudspulser placeras ut på en lämplig mätsträcka av älven. Genom att mäta gångtidsskillnaden för en puls som rör sig med respektive mot strömmen kan linjemedelvärdet på hastigheten för ljudsträckans bana beräknas. Genom att lägga strålbanorna på ett antal olika nivåer samt i kors över älven, kan man från den insamlade informationen beräkna flödet i mätsektionen med en noggrannhet på 1–3 % om en lämplig mätsektion finns. Om mätsträckan kan placeras tillräckligt nära utskoven blir felet i magasinering och lokal tillrinning försumbart. Helst bör mätsträckan placeras uppströms utskoven, ultraljudsignalen är känslig för inblandad luft i vattnet från t ex en energiomvandlare (luften i vattnet dämpar snabbt ut signalen). Skall mätningen göras på nedströmssidan får man finna en mätsektion så långt nedströms att luften i vattnet inte ställer till problem.

En metod som också bygger på akustisk mätteknik presenterades i Sverige sommaren 1992 av R. D. Instruments. Metoden, på engelska "Acoustic Doppler Current Profiler" (ADCP), bygger på dopplereffekten. En båt med utrustningen åker tvärs älven i mätsektionen och mäter hastighetsprofiler snett ner mot botten. Noggrannheten i flödesmätningen uppges i företagets information till ±2%, vilket kan gälla för jämna, grävda kanaler. I svenska oregelbundna älvar blir noggrannheten ca ±4%. Metoden har samma svaghet som Accusonic – luft i vattnet dämpar ut ultraljudsignalen. Mätsektionen måste läggas tillräckligt långt nedströms utskoven för att garantera vatten fritt från luft eller tillräckligt långt uppströms för att minimera olycksrisken. Att lägga mätsektionen strax uppströms fullt öppna utskov är inte att rekommendera. Vid t ex motorstopp måste ankare läggas i kanske snabbt strömmande vatten, vilket inte är en riskfri operation.

Ytterligare en metod är flygelmätning från båtar där båtarna hålls på plats av en wire tvärs älven. Metoden är tveksam dels på grund av dålig noggrannhet, 5–10%, dels på riskerna för besättningen.

Ytterligare andra metoder är de som bygger på utspädning av fluoriserande färger, salter eller radioaktiva ämnen. I praktiken är de inte gångbara i större vattendrag då man antagligen av olika skäl inte kan släppa ut de kvantiteter av dessa ämnen som behövs för mätningen.

3.5. Kostnader

Den enklaste formen för bestämning av avbördningskapacitet är med handformler och teoretiska beräkningar. Med ledning av befintliga ritningar över utskovet och bottenkarta över omgivande terräng kan en flödesbestämning som regel göras för mellan 10 000 och 30 000 kr.

Kostnaden för en provtappning och samtidig flödesmätning kommer dels från själva mätningen dels från vattenspillet.

Flödesmätning med Accusonic i ett öppet vattendrag inklusive nivåmätning för korrektion av magasinering kostar mellan 300 000 och 500 000 kr. Den höga kostnaden gör att metoden antagligen är intressant endast om mätningen kan kombineras med t ex relativmätning av verkningsgradskurvor för driftoptimering av en fleraggregatstation.

För flödesmätning med ADCP-systemet ligger motsvarande kostnad på ca 50 000 kr.

Kostnaden för en flygelmätning är svårbedömd. Skall man följa IEA-normerna med krav på mättid i varje mätpunkt och antal mätpunkter ger detta lång mättid och stort vattenspill. Dessutom bör flyglarna kalibreras i samband med mätningen. Kostnaden för en flygelmätning bedöms ligga mellan 50 000 och 100 000 kr.

Metoden att utnyttja en kraftstations turbiner för flödesmätning kräver oftast en omständligare övervakning och registrering av vattenståndet mellan utskov och kraftstation. Avståndet blir lätt stort och magasineringen måste beräknas så noggrant som möjligt. Kostnaden för den egentliga flödesmätningen genom turbin kan ligga runt 10 000 kr, medan kostnaden för tillhörande nivåmätning kan vara betydligt högre; totalkostnaden kan bli mellan 20 000 och 100 000 kr.

För samtliga varianter med provtappning tillkommer också kostnaden för det vatten som spills. Om detta vatten istället skulle kunna sparas i ett högt liggande magasin från sommaren med lågt pris per kWh till vintern med högt pris, blir kostnaden för spillet högt – i storleksordningen 100 000-tals kronor.

Kan man däremot utnyttja vatten som ändå skulle spillas, är kostnaden för spillet försumbart. Innan man bestämmer sig för metod bör man noggrant uppskatta samtliga kostnader. Kostnaden för en matematisk modell för noggrann beräkning av utskovsvattenföringen ligger mellan 100 000 och 200 000 kr beroende på hur komplicerade beräkningarna blir. En anläggning där de olika utskovens avbördningsförmåga påverkar varandra eller påverkas av turbinvattenföringen är ett exempel på komplicerande faktorer.

Motsvarande kostnad för en fysisk modell ligger mellan 200 000 och 500 000 kr. En fysisk modell kan trots den höga kostnaden vara ett bra val, framförallt om man samtidigt kan utnyttja den för andra ändamål.

I de ovan redovisade kostnaderna för matematiska och fysiska modeller ingår inte kostnaden för eventuell uppmätning av bottentopografi, vattenstånd eller strömbild. Det är ganska vanligt att bottentopografin är känd sedan byggtiden. Vissa kompletteringar kan dock behöva göras. Behovet av dessa uppmätningar är identiskt lika för både den fysiska och den matematiska modellen då det område som behöver modelleras är lika stort i båda fallen.

4. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

4.1. Allmänt

Utförda provtappningar och andra undersökningar pekar på att det kan finnas stora avvikelser mellan den verkliga och den tidigare bedömda avbördningskapaciteten hos svenska dammars utskov. Det kan bero på schablonmässiga kapacitetsbestämningar och på att olika tekniska begränsningar ofta förhindrar utnyttjande av den fulla kapaciteten.

Vid bestämning av utskovs avbördningskapacitet bör man därför skilja på **hydraulisk och teknisk avbördningskapacitet**.

Den hydrauliska avbördningskapaciteten är den som en fri utskovsöppning har under förutsättning att utskovets och angränsande vattenvägars dimensioner, form och läge överensstämmer med vissa preciserade antaganden och förblir opåverkade av strömningen.

Den tekniska avbördningsförmågan kan avvika markant från den hydrauliska på grund av att olika tekniska faktorer leder till inskränkningar. Typiska exempel är erosion, kavitation, vibrationer, pulsationer eller höga vattenstånd som direkt eller indirekt hotar väsentlig anläggningsdel när utskovet används. Andra exempel är geometriska avvikelser mellan verklig anläggning och antagna förhållanden, deformationer och hållfasthetsproblem. Ofta är inte utskoven konstruerade för att fungera med hög tappning under så långa tidsrymder som blir aktuella vid passage av Flödeskommittens dimensionerande hydrografer. Det gäller speciellt om någon typ av flödesdämpning sker. Även risker för t ex erosion i berg måste beaktas.

Ur dammsäkerhetsmässig synvinkel kan utskovs användbarhet dessutom begränsas genom blockering av drivgods och fel i t ex manövreringsanordningar innebärande att luckor av olika anledningar inte kan öppnas.

Vid anpassning av svenska dammanläggningar till Flödeskommittens riktlinjer är det angeläget att man känner inte bara utskovens hydrauliska utan även deras tekniska avbördningskapacitet och dessutom undersöker utskovens dammsäkerhetsmässiga tillgänglighet. Det kräver en **systematisk och kvalificerad granskning** av tidigare gjorda antaganden och förutsättningar med särskild tonvikt på faktorer som kan begränsa möjligheterna att utnyttja utskovens hydrauliska kapacitet.

En ordentlig dokumentation av antaganden och förutsättningar för utskovens dimensionering, underhåll och drift skall finnas och bör inkluderas i dammliggare eller på annat sätt göras åtkomliga och kända för dammansvariga.

4.2. Prioritering

Utskov vars avbördningskapacitet är särskilt angelägna att kontrollera kan utskiljas efter två olika kriterier, nämligen dels med ledning av **konsekvenserna** av en felaktigt uppskattad avbördningsförmåga och dels utifrån **svårigheterna** att korrekt uppskatta densamma.

Det första kriteriet fångar i princip in alla flodutskov vid klass I-dammar, som inte kan anses tåla överströmning och dessutom även andra utskov som i händelse av överbelastning kan hota dammsäkerhetsmässigt vitala konstruktioner vid klass I-anläggningar eller eljest innebära risker av motsvarande slag. Här bör man innefatta även utskov vars kapacitet preliminärt inte bedöms vara tillräckliga, innebärande att tekniska åtgärder eller andra större investeringar planeras för anpassning till Flödeskommittens riktlinjer; för dessa senare utskov kan det vara angeläget pröva att kapaciteten inte underskattats.

Det andra kriteriet inbegriper utskov av betydelse för dammsäkerheten, vars kapacitet tidigare bedömts schablonmässigt eller som av olika anledningar är särskilt svårbedömda. Hit hör utskov som framgent kan behöva motstå förhållanden de ursprungligen inte varit avsedda för, t ex högre vattenstånd och tappning eller kontinuerlig tappning under längre tid. Vidare inbegrips flertalet av bottenutskoven och dessutom andra utskov, som är känsliga i något avseende, t ex:

- utskov i fyllnadsdammar eller med vattenvägar schaktade i jord (erosionsrisk)
- utskov med sned eller trång tillströmning (sidokontraktion, friktion)
- utskov med begränsade eller små öppningar (igensättning, sidokontraktion)
- utskov i dammar under 5–10 m höjd (indämning)
- utskov i dammar över 25–40 m höjd (energiomvandling, kavitation)

Ovanstående kriterier fångar med säkerhet inte in alla problematiska utskov och får därför ses som ett komplement till sunt förnuft och vanlig försiktighet.

4.3. Metodval

Valet av metod för att bestämma utskovs kapacitet beror på föreliggande kvalitetskrav och på vad som är tekniskt och juridiskt möjligt och ekonomiskt rimligt. Innan man bestämmer sig för metod bör man så noggrant som möjligt gå igenom de olika alternativen för en kostnadsuppskattning och då också försöka bedöma den kvalitet och noggrannhet man får med de olika metoderna.

Ur teknisk synpunkt måste en provtappning till full kapacitet helst med samtidig noggrann flödesmätning vara att föredra. Man får förutom flödesbestämningen också svar på frågor om översvämning, erosion, luftproblem etc, frågor som man inte fullt ut kan få svar på genom någon annan metod. Av juridiska, ekonomiska och praktiska orsaker är det emellertid som regel inte möjligt att genom provtappning undersöka förhållandena vid höga vattenstånd uppströms eller nedströms.

Vid provtappning är flödesbestämningen en stor svårighet. Om ADCP-metoden visar sig hålla bör den vara ett bra alternativ. Alternativet flödesmätning med Accusonic är dyrt men är ett bra alternativ om mätningen kan göras samtidigt med t ex en driftoptimering av en fleraggregatstation där Accusonicmätningen ingår. Marginalkostnaden för att använda Accusonicmätning vid en provtappning blir då försumbar.

Överhuvudtaget bör man söka efter samordningsvinster för att hålla nere kostnaderna. Det gäller också kostnaderna för vattenspillet, kan man utnyttja en vår- eller höstflod blir den kostnaden minimal. Om en provtappning med samtidig flödesmätning inte är tekniskt eller ekonomiskt möjligt att genomföra står valet mellan fysisk modellering, matematisk modellering eller teoretiska beräkningar. De olika metoderna har alla sina fördelar och nackdelar. Teoretiska beräkningar ger snabbt resultat till en låg kostnad, den matematiska modellen har fördelen att man snabbt kommer fram till ett resultat och att den rimligen bör var billigare än en fysisk modell.

Den fysiska modellen har fördelen att den är flexibel, den kan användas till att lösa andra strömningstekniska problem som att utforma energiomvandlare, bestämma våghöjd, erosion eller deposition av lösmassor etc. Behöver man en fysisk modell av andra anledningar än att bestämma utskovens kapacitet är marginalkostnaden låg för detta.

Avbördningskapacitet bör anges med feluppskattning. Det är troligt att en god precision i många fall kommer att ha ett betydande värde. Vidare bör det alltid klargöras om uppgiften avser hydraulisk eller teknisk avbördningskapacitet. Eventuella dammsäkerhetsmässiga begränsningar i utskovens användbarhet anges särskilt.

En sammanfattning av uppskattad kostnad, resultatets precision och användbarhet för de olika metoderna ges i tabell 1. Den förväntade precisionen anges här med ett spridningsmått som närmast motsvarar begreppet standardavvikelse. Dessa metoder för bestämning av utskovs kapacitet bör regelmässigt kompletteras med en kvalificerad teknisk granskning av konstruktionernas förmåga att motstå förekommande hydrauliska belastningar under aktuella tidsperioder, eftersom äldre designfilosofier för utskov, vattenvägar och energiomvandlare inte alltid svarar mot dagens säkerhetskrav.

Metod	Kostnad kkr	Precision, % vid best. av hydraulisk kapacitet	Användbarhet för best. av teknisk kapacitet
Teoretiska beräkningar	10–30	±3–8	(X)
Matematisk modell	100–200	±3	(X)
Fysisk modell	200–500	±1,5–3	X
Provtappning*			X
Accusonic	300–500	±2	
ADCP	ca 50	±4	
Turbiner	20–100	±2	
Flygel	50–100	±5	

Tabell 1. Sammanställning av metoder för bestämning av utskovskapacitet.
X Metoden användbar
(X) Metoden användbar i begränsad utsträckning
** Kostnaden för vattenspill tillkommer*

5. REFERENSER

[1] US Corps of Engineers: *Hydraulic Design Criteria*

[2] IAHR Hydraulic Structures Design Manual: *Discharge characteristics*

[3] Norsk Hydroteknisk Laboratorium: *Avlöpsdata i elver og vassdrag*

[4] VBB/SWECO, Holmén & Bard: *Numerical simulation and model testing of a by-pass conduit for Holmen hydro power plant*

[5] VBB Anläggning, Bard & Rytters: *Strömningen i Trängslets utskov beräknad i numerisk modell*

[6] Vattenfall Utveckling, Fredriksson & Östberg: *Matematisk modellering av utskovskapacitet*

[7] Yalin, M. S.: *Theory of hydraulic models*, Macmillan

[8] Novak, P., Cabelka, J.: *Models in hydraulic engineering*, Pitman

[9] Kolkman, P. A.: *Considerations about the accuracy of discharge relations of hydraulic structures and the use of scale models for their calibration*. Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures. Technische Akademie Esslingen, Germany

[10] Sharma, H. R.: *Air demand for high head gated conduits*. The University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology

6. BILAGOR

Bilaga 1A. Tappningsprov i Trängslet. September 1989. (DVF)
Bilaga 1B. Ytutskov i Trängslet. Hydraulisk avbördningsförmåga
Bilaga 2. Andra provtappningar vid svenska dammar

TAPPNINGSPROV I TRÄNGSLET
September 1989

DVF

PM TAPPNINGPROV - TRÄNGSLET

0 - SAMMANFATTNING

1 - ORIENTERING

2 - OBSERVATIONER

3 - SLUTSATSER/ATGÄRDER

Bilagor (diagram)

0 - SAMMANFATTNING

I samband med driftstoppet i Trängslet under september 1989 gjordes ett större tappningsprov av Trängsletdammens flodutskov, spillränna och vattenvägar ner till Asendammen. Som mest tappades ca 600 m^3/sek. Utskoven är dimensionerade för närmare 1000 m^3/sek. Resultatet av tappningsprovet påvisade följande:

- *Intaget till flodutskoven måste få en bättre utformning.*
- *Spillrännan är tillräckligt stor.*
- *Omloppstunnel 2 utgör ingen risk vid kraftig tappning*
- *Läsidan på dammen kommer att bli utsatt för bakvatten utan bakströmmar men med vågskvalp. Ett extra skydd mot vågerosion bör övervägas.*
- *Vid spill över 600 m3/sek bör uppställningsplanen, mitt emot spillrännans överfall ner i älvfåran, avlysas p g a risken för 'stenskott'.*
- *Tillfartsvägen till Trängslet blir obrukbar vid spill på 5-600 m3/sek och uppåt. Samtidigt kommer eroderat material att uppgrunda utloppskanalens botten. Fördjupning av den gamla älvfåran bör utredas.*
- *Skiljebanken mellan utloppskanalen och den gamla älvfåran kan delvis raseras och därmed reducera bruttofallhöjden i Trängslets kraftstation.*

Vidare kunde det konstateras att:

- *Tabellerna för utskovsluckorna ger för lite vatten. Ca 93 % av förväntad mängd erhölls under provet.*
- *Flyttiden är beroende av tappningsnivån. Vid maximalt pådrag rör sig fronten med en hastighet av 25 - 30 km/tim.*

DVF
Dalälvens Vattenregleringsföretag.

Oktober 1989
/Anders Heldemar/

1 - ORIENTERING

I samband med driftstoppet i Trängslet under september aktualiserades en gammal ide om ett rejält spillvattentest från Trängsletdammen. Avsikten var att studera hur spillvattenrännan och utskovsintaget samt den gamla älvfåran uppträder den dag Trängsletdammens totala utskovskapacitet måste utnyttjas. Provet genomfördes tisdagen den 19 september med stegvis upptrappad tappning. Båda flodutskovsluckorna användes (parallellkördes) så att 100 m³/sek tappades under en timme, 200 m³/sek under nästa, 400 m³/sek under den tredje timmen samt slutligen ca 600 m³/sek under 7 minuter. I det läget spilldes en effekt motsvarande närmare 800 MW (nästan ett normalt kärnkraftverk), möjligen ett av det 'effektfullaste' spill som gjorts i Sverige. Total tappades ca 34 DE under provtiden. Se diagram 1. Flodutskov och tappningsränna är dimensionerade för ca 950 m³/sek. Sedan Trängslet byggdes 1959 har veckomedeltillrinningen - vid sidan av vårflöden, då dammen är tom - aldrig överstigit 310 m³/sek. Sannolikheten för att man måste utnyttja flodutskoven för tappningar över 500-600 m³/sek är därför mycket liten. I de nya dimensioneringsnormer som nu tas fram kommer dock den maximalt erforderliga tappningen att uppgå till drygt 1000 m³/sek.

Provtappningen organiserades av DVF med hjälp av personal från Stora Kraft.

2 - OBSERVATIONER

Under provet gjordes observationer på följande punkter:

1. - Intaget till flodutskov.
2. - Spillvattenrännan första del.
3. - Utloppet av omloppstunnel 2.
4. - Läsidan av dammfot.
5. - Spillrännans inlopp i gamla älvfåran.
6. - Lågpunkter i gamla älvfåran.
7. - Landsvägsbro vid utloppskanalen.
8. - Skiljebank mot utloppskanalen.
9. - Kontinuitetskontroll av luckkapacitet.
10. - Flyttidsobservationer vid olika pådrag.

2.1 INTAGET TILL FLODUTSKOV

Flodutskovsluckorna för Trängsletdammen är utformade för att vid full dämning i sjön kunna avbörda mer än 950 m³/sek (enligt avbördningstabeller upprättade av VBB 1983.05.31). Redan vid 400 m³/sek uppstår stark strömning längs den 'dammpäls' som ligger närmast utskovet. Erosion kunde iakttas under den korta tid (ca 7 minuter) som utskovet öppnades för ca 600 m3/sek.

Se fotografi 1.

Foto 1: *Flodutskovsintaget vid 400 m³/sek*

2.2 SPILLVATTENRÄNNANS FÖRSTA DEL

Vid tidigare spilltillfällen (15 - 200 m³/sek) gjordes en del observationer som medförde farhågor kring rännans storlek. Rymmer den verkligen den dimensionerade vattenföringen utan att brädda över vatten till dammkroppens omedelbara nedströmssida. Resultatet av aktuellt prov visar att det vattensprång (fysikalisk beteckning) som erhålls vid höga tappningar inträffar långt ner i spillrännan. överslag till läsida av dammen kommer inte att inträffa. Möjligen kommer en del av vattnet att 'stänka' över till den östra sidan av spillrännan vilket dock inte har någon större menlig inverkan.

2.3 UTLOPP AV OMLOPPSTUNNEL 2

Omloppstunnel 2 mynnar ut i spillrännans övre del. Den är där igengjuten med undantag för en lucköppning på 1.20 x 1.20 m. Lucköppningen är stängd med en enklare stållucka. Vid höga tappningar i spillrännan stiger bakvatten upp på luckan och förmodligen även någon halvmeter över luckans överkant, vid maximalt pådrag. Omloppstunneln skär genom inspektionstunneln i dammen och här är då inpspektionstunneln blockerad med en kraftig stålport. Rutinmässigt hålls denna stålport alltid stängd när spillrännan utnyttjas.

Provtappningen visar att risken för inläckage till maskinhallen i Trängslet via omloppstunnel 2 är mycket liten. Om mynningsluckan för omloppstunnel 2 skulle haverera och vatten bakvägen nå fram till stålporten till inspektionstunneln kan emellertid vattnet inte tränga vidare. Därtill blir vattentrycket alldeles för lågt.

2.4 LÄSIDAN AV DAMMFOT

Vid dammfoten på läsidan, 150 m uppströms spillrännans inlopp i den gamla älvfåran, ökar vattenståndet kraftigt. Som framgår av bilagt

diagram 2. ökar vattenstandet mättligt till att börja med. Vid högre tappningar bildar dock överfallet ner i älvfaran en form av 'vatten-vägg' som stänger inne det vatten som pressas mot dammfoten. Vid maximalt spill kommer vallen, där pegelbrunn för läckvattenströmning finns, att dränkas. Strömningsförhållanderna blir dock förhållandevis lindriga. Bakströmmar saknas medan vågskvalpet blir relativt kraftigt.

2.5 SPILLRÄNNANS INLOPP I GAMLA ÄLVFÅRAN

Spillrännan bildar ett mäktigt vattenfall då vattnet den sista biten störtar sig ner i den gamla älvfaran. Från 200 m^3/sek och uppåt blir vind- och dimbildning rätt kraftig på motstående sida. Vid tappningar från 600 m^3/sek och uppåt slängs även mindre stenar upp på motstående sida vilket gör den normala uppställningsplanen farlig att vistas på. Vid maximalt pådrag kommer spillrännan, strax innan överfallet, att brädda över något och ta med sig lite skog ner i den gamla älvfaran.

Foto 2: *Spillrännans vattenfall ner till gamla älvfåran*

2.6 LÅGPUNKTER I GAMLA ÄLVFÅRAN

Den mest kritiska 'lågpunkten' längs den gamla älvfåran är där tillfartsvägen till Trängslet löper parallellt med älven. Detta är ca. 4 km nedströms dammen. Som framgår av bilagt diagram 3. börjar det bli kritiskt redan vid ca 500 m^3/sek. Kraftig erosion inträffar fram mot vägbanken varför ett fortvarighetstillstånd redan på denna nivå troligen skulle äventyra vägens säkerhet och framkomlighet.

2.7 LANDSVÄGSBRO VID UTLOPPSKANAL

över den gamla älvfåran - i höjd med utloppskanalen [illegible] en landsvägsbro över till östra sidan. Brostöden [illegible] referens för att registrera vattenståndsförändringar [illegible] avbördningskurva som finns redovisad [illegible] att bron i sig förmodligen klarar av att avbördas [illegible] tillfarten från södra sidan då [illegible] utvecklingen vid punkt 2.6

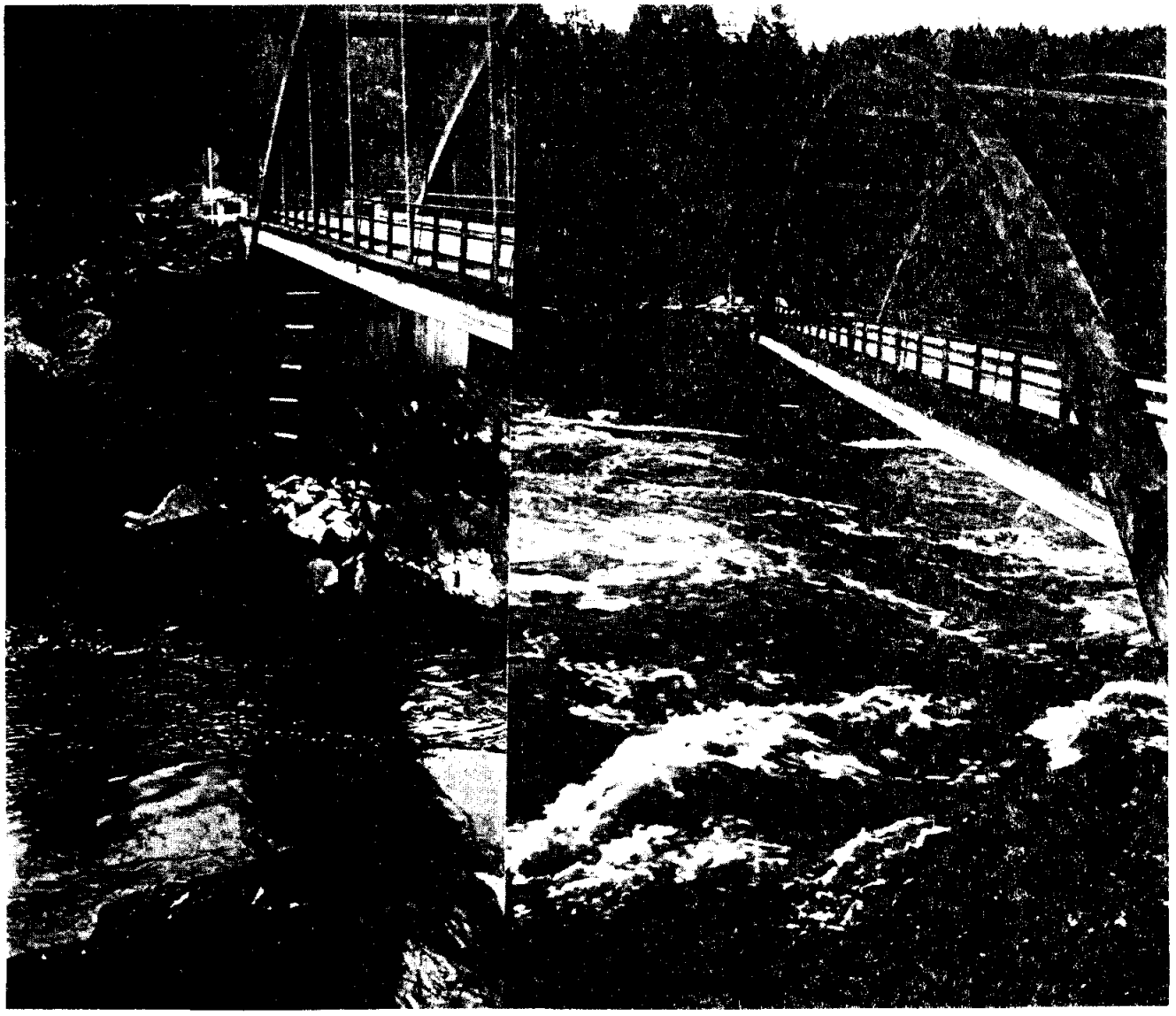


Foto 3,4: *Landsvägsbron vid 100 m³/sek resp. [illegible] m³/sek*

2.8 SKILJEBANK MOT UTLOPPSKANALEN

Mellan den fördjupade utloppskanalen och den gamla älvfåran finns en skiljebank bestående av ursprungligt berg pålattrad med en del grövre fyllnadsmassor. Redan vid 200 m³/sek börjar vatten från älvfåran att sippra igenom banken och ner till utloppskanalen. [illegible] resulterade som mest i en vattenföring på ca 450 m³/sek i älvfåran. Vid denna vattenföring var läckaget [illegible] utloppskanalen kraftigt dock utan synbar [illegible] vattenföringen i älvfåran öka ytterligare [illegible] mer synbar erosion i skiljebanken [illegible]

utloppskanaler. Hårvitlad reduceras [illegible] i Trångslets kraftstation.

Foto 5. *Överströmning till utloppskanalen vid 200 m3/sek i spill*

2.9 KONTINUITETSKONTROLL AV LUCKKAPACITET

Lucktabellerna som finns för utskovsluckorna är teoretiskt bestämda. Vid kraftigt spill blir fallförlusterna i intagskanalen till utskovsluckorna stora och friktionskoefficienten egentligen omöjlig att teoretiskt beräkna. I samband med provet kontrollerades därför den tänkta tappningen från Trångslet med den vattenkvantitet som verkligen kom fram ner till Åsendammen. Bestämning av tillrinning till Åsendammen (låg tappning + stor magasinsförändring) får anses som säkrare än tappad vattenmängd via utskovsluckorna. Överlag erhölls ca 93 % av önskad mängd vid provtappningen. När lucktabellerna visar ex 600 m^3/sek tappades i praktiken ca 550-560 m^3/sek.

Se diagram 5.

2.10 FLYTTIDSOBSERVATIONER VID OLIKA PÅDRAG

Nere vid landsvägsbron (4.5 km från utskoven) gjordes särskilda observationer på flyttider. Från att vid ökningar från 15 - 100 m^3/sek ha tagit ca 35 minuter för fronten att nå bron tog det vid ökningen från 400-600 m^3/sek endast ca 10 minuter. I det sista fallet kom alltså fronten med en hastighet av ca 25 km/tim !!.
Stationärt tillstånd (fortvarighetstillstånd) erhölls vid den första ökningen efter ca 75 minuter medans det för ökning från 200-400 m^3/sek tog ca 40 minuter. Pådraget på ca 600 m^3/sek var alldeles för kortvarigt för att något stationärt tillstånd skulle hinna erhållas.

Att vatten rinner fram snabbare vid några vattenföringar är en naturlig följdeffekt som kan utläsas ur avsänkningskurvan (se

diagram 4.). Det krävs mindre vattenståndsförändringar för att öka vattenföringen ju högre upp man kommer.

3. SLUTSATSER - ÅTGÄRDER

Hela dammanläggningen vid Trängslet är dimensionerad för att vid full dämning kunna avbörda ca 1000 m³/sek. Det är därför viktigt att betrakta dammanläggningen som en integrerad enhet hela vattenvägen ner till utjämningsmagasinet i Åsen. Spillrännan får anses vara tillräckligt dimensionerad. Utloppet av 'omloppstunnel två' utgör inte heller den något större problem. Varför den inte är fullständigt igengjuten har det inte givits något svar på. Vid kraftigt spill (> 600 m³/sek bör inte eventuella åskådare vistas nära spillrännans inlopp i den gamla älvfåran. Resultat och iakttagelser från provtappningen visar i övrigt på att en del åtgärder får anses som nödvändiga.

3.1 INTAGET TILL FLODUTSKOV

Utformningen av intaget till flodutskoven bör uppenbarligen förbättras. En virvelbildare ska installeras vid flodutskovet under denna vinter varvid intag och dammpäls kan inspekteras utan skymmande is, vid avsänkningen i vinter. Normala år hinner man aldrig syna intagskanalens verkliga utseende i detalj.

3.2 LÄSIDA AV DAMMFOT

Ett tvärsnitt av dammbyggnaden bör studeras av en dammbyggnadsexpert. Om ett högt vattenstånd, utan bakströmmar men med vågskvalp kan anses ha en negativ inverkan får ett extra skydd anläggas. I annat fall kan detta lämnas utan åtgärd.

3.3 LÅGPUNKTER I GAMLA ÄLVFÅRAN

Som framgår i stycke 2.6 kommer tillfartsvägen till Trängslet troligen att vara oanvändbar vid långvariga tappningar över 500-600 m³/sek. Det finns grusade tillfartsvägar från andra håll till Trängslet. Den flödessituation som är grundorsaken till denna kritiska nivå har sin upprinnelse i osedvanligt kraftiga regn med eventuella snösmältningsbidrag. Lokala mindre vägar är då många gånger spolierade av översvämmade mindre bäckar. Det visade inte minst höstflödet 1985. De grusade tillfartsvägarna till Trängslet måste klassas som sådana 'mindre vägar'. Med andra ord ska allt som behövs i Trängslet vid en extrem flödessituation redan finnas på plats innan tappningen ökas till mer än 500-600 m³/sek. Vid ytterligare ökning blir Trängslet isolerat - utan tillfartsvägar - vilket måste vara tämligen olyckligt, speciellt som det bl a finns ett militärförband stationerat i anslutning till kraftstationen.

Alternativet är att fördjupa den gamla älvfåran på ett sådant sätt att den normala tillfartsvägen alltid kan utnyttjas. Fördjupning innebär ett omfattande sprängningsarbete på 10-15 000 m³ (grovt uppskattat). Sprängmassorna skulle kunna bli ett utmärkt erosionsskydd för tillfartsvägen, från landsvägsbron över den gamla älvfåran och vidare uppåt.

3.4 SKILJEBANK MOT UTLOPPSKANALEN

Maximalt spill kommer att delvis rasera skiljebanken mellan den gamla älvfåran och utloppskanalen. Alternativen är här antingen en dyrbar förstärkning av skiljebanken eller en kostsam rensning av utloppskanalen den dag skiljebanken raserats. Då sannolikheten för spillvattentappningar överstigande 600 m^3/sek är ytterst liten är det senare alternativet att föredra.

3.5 LUCKTABELLERNA

Kontinuitetskontrollen indikerade att de uppgjorda lucktabellerna (VBB diagram 3 83.05.31) ger för lite vatten. Misstämmigheten kan möjligen bero på felaktigheter i magasinstabellen för Åsenmagasinet. Det är dock mera troligt att inströmningsförlusterna vid flodutskoven är större än vad lucktabellerna förutsätter. Ifall lucktabellerna nu är helt korrekta eller ej har emellertid ingen praktisk betydelse. I de sällsynta situationer som spillutskoven måste användas gör 5-10% fel varken från eller till. Däremot har det en viss betydelse om flodutskoven (fullt öppna luckor) verkligen avbördar angivna 950 m^3/sek vid dämningsgräns och inte i praktiken 70-100 m^3/sek mindre. Betydelse i så måtto att marginalen för Trängsletdammen minskar vid en genomräkning med de nya dimensioneringsnormerna.

Bilagor: diagram 1. Tappningstrappa.
-"- 2. WQ-samband DAMMFOT
-"- 3. WQ-samband vid vägen (4 km nedströms)
-"- 4. WQ-samband Landsvägsbron
-"- 5. Ackumulerade TE-samband

Diagram 1.

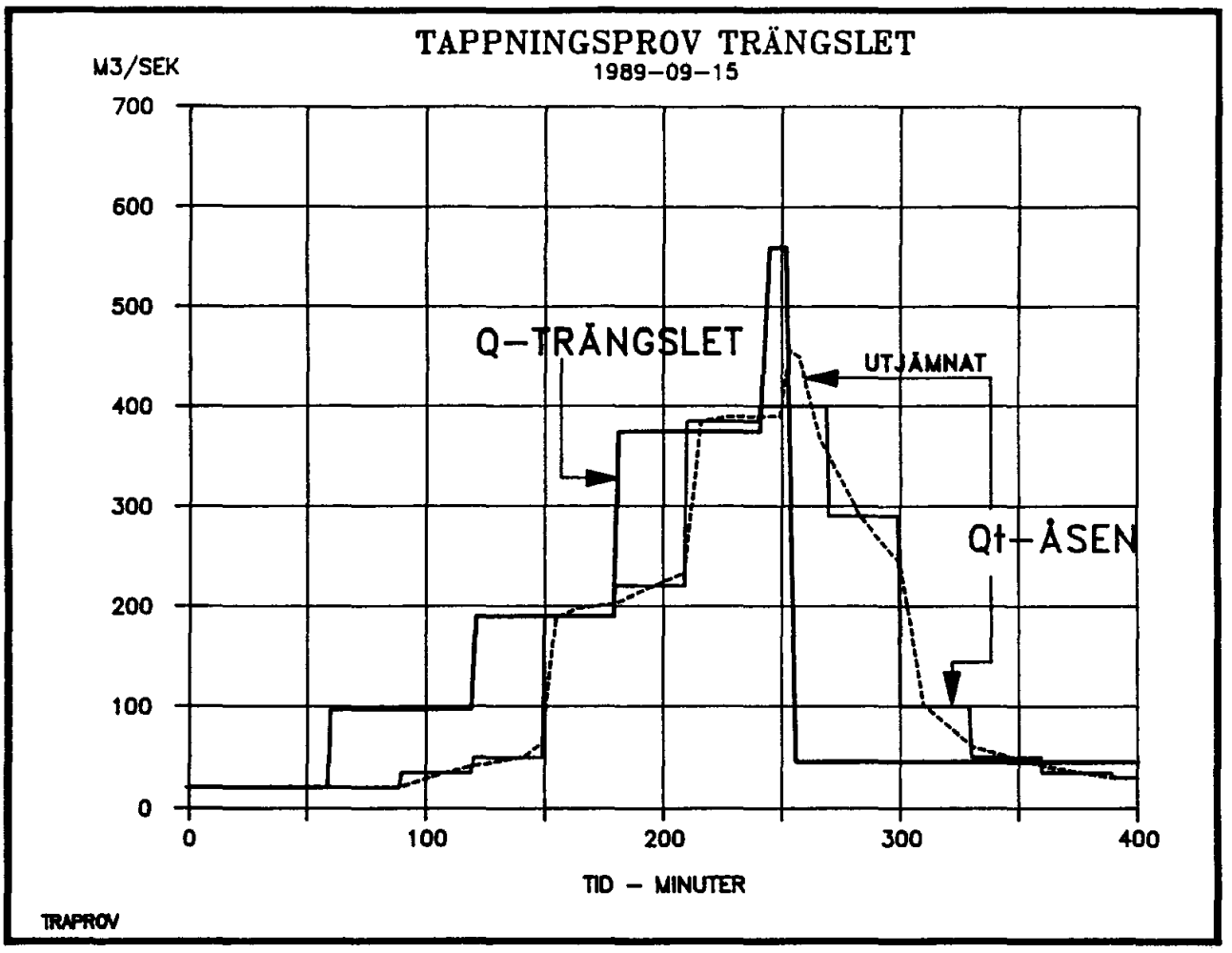
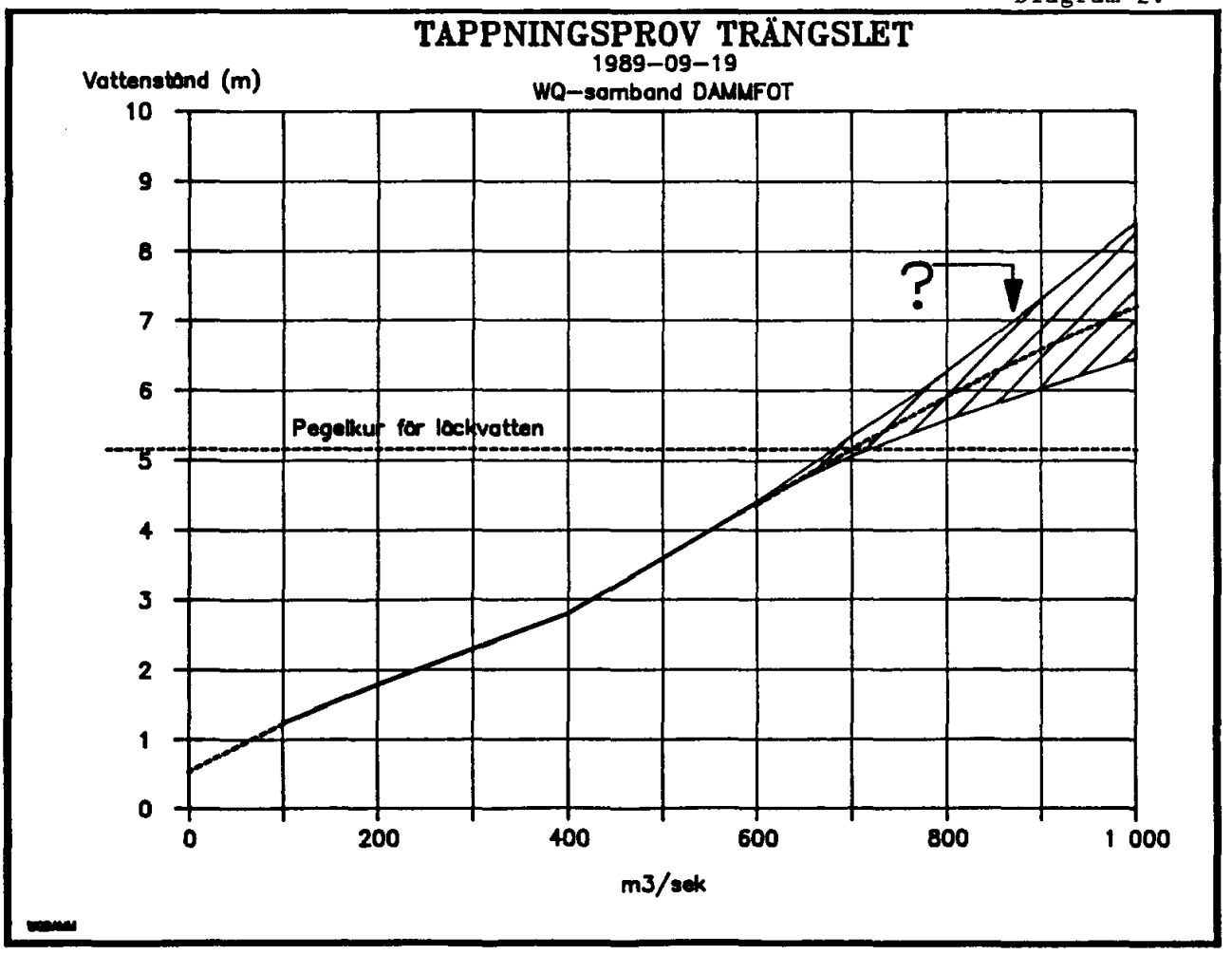


Diagram 2.



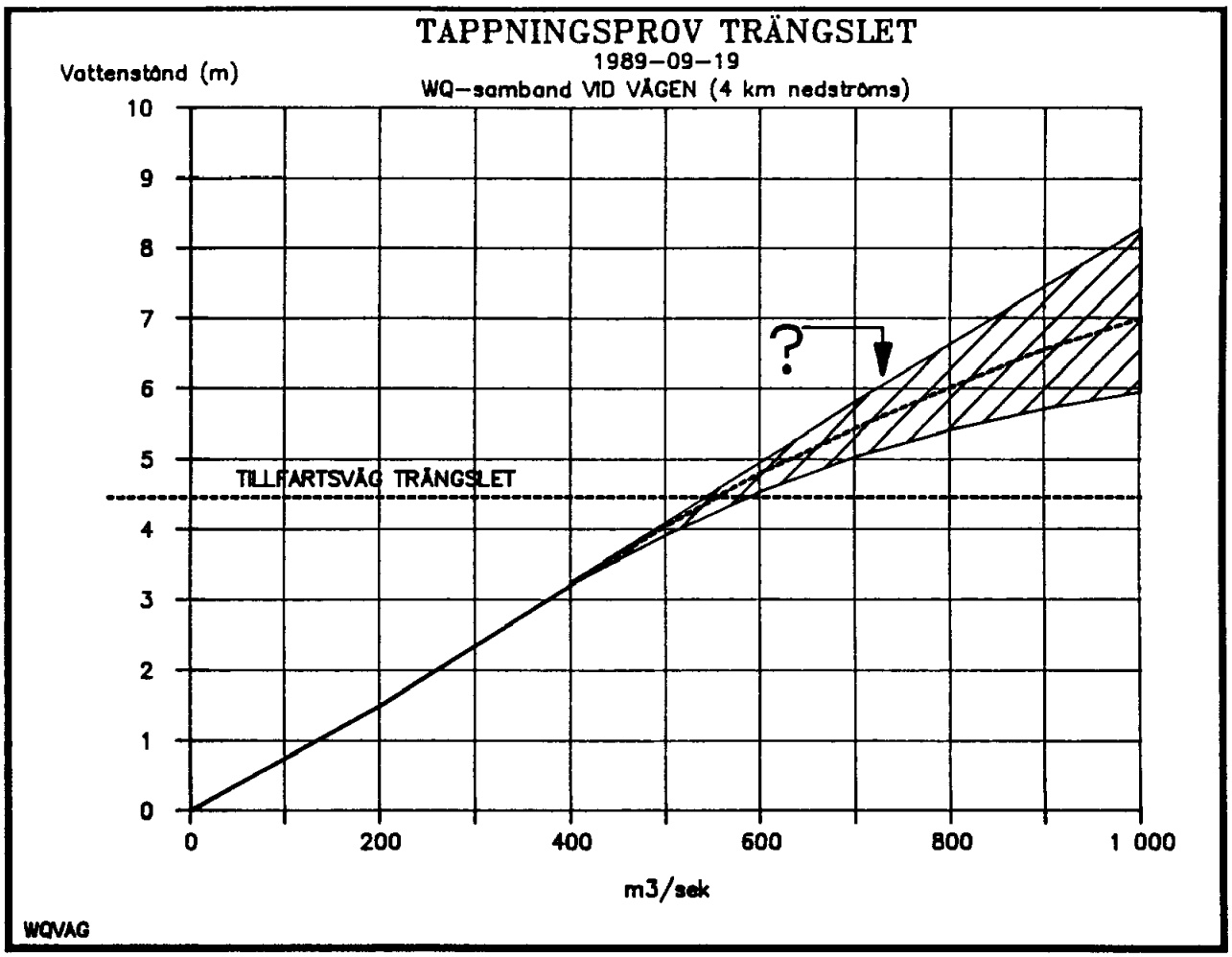

TAPPNINGSPROV TRÄNGSLET
1989-09-19
WQ-samband VID VÅGEN (4 km nedströms)
Vattenstånd (m)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
TILLFARTSVÄG TRÄNGSLET
?
0
200
400
600
800
1 000
m3/sek
WQVAG

Diagram 4.

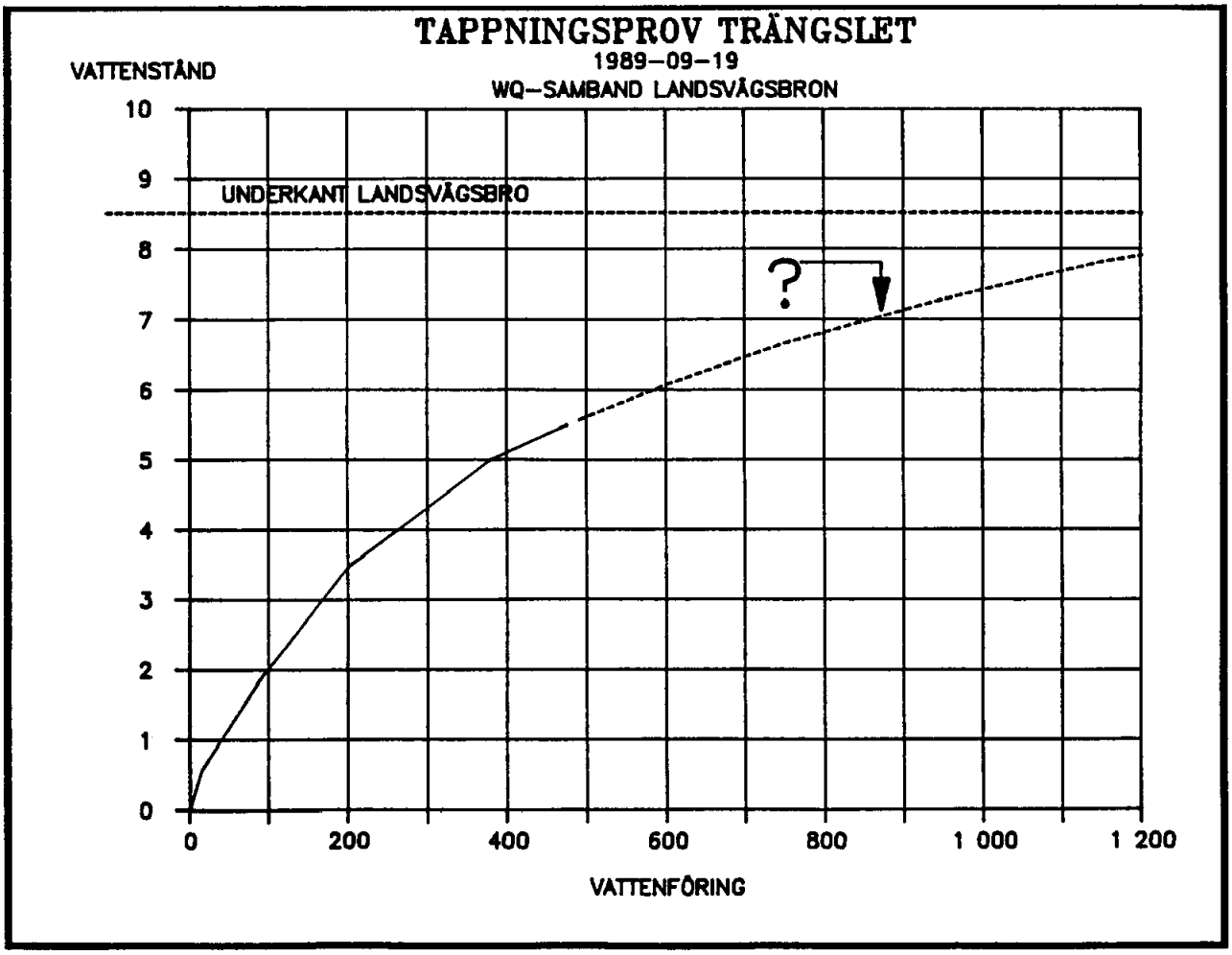
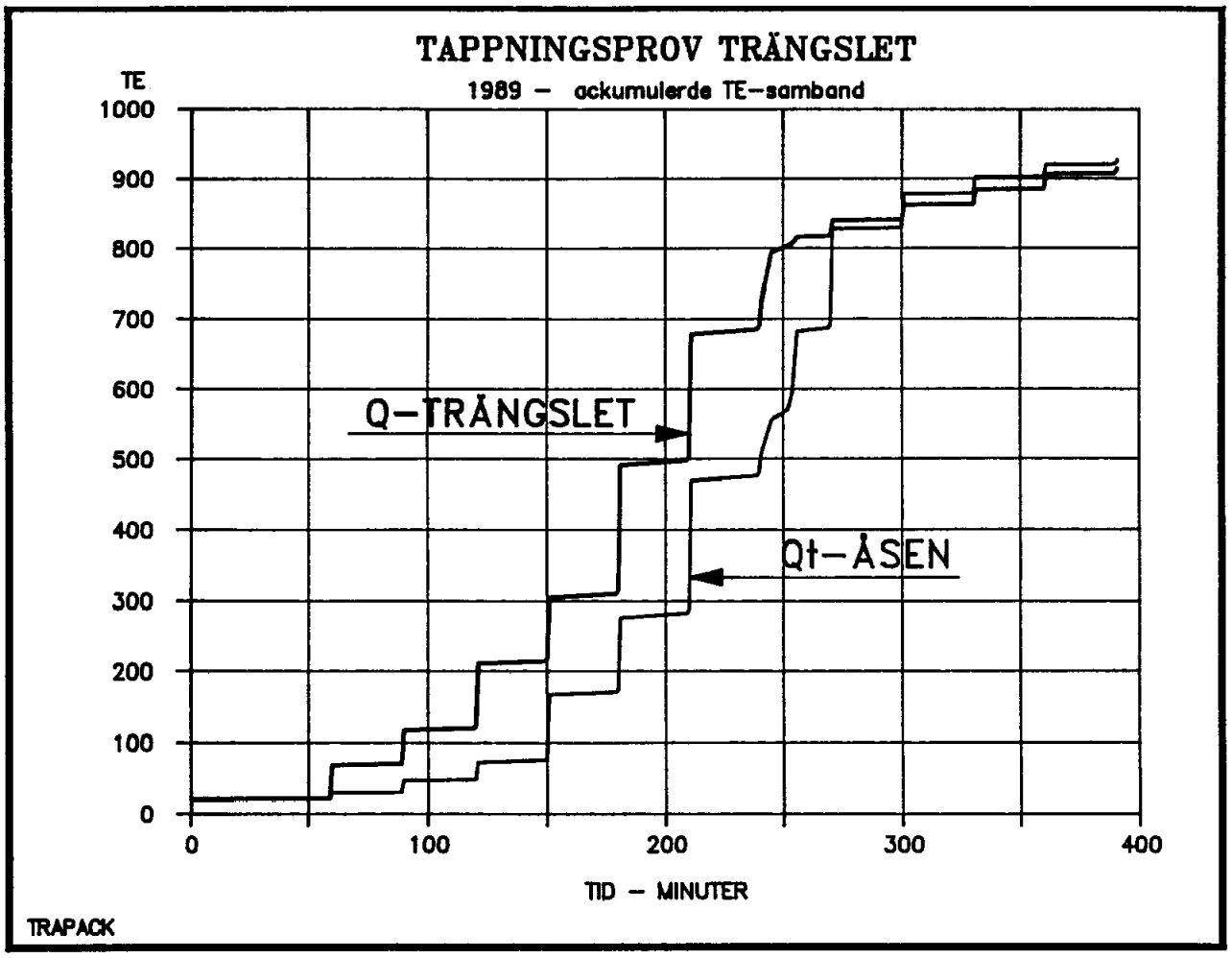

TAPPNINGSPROV TRÄNGSLET
1989-09-19
WQ-SAMBAND LANDSVÄGSBRON
VATTENSTÅND
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
UNDERKANT LANDSVÄGSBRO
?
0
200
400
600
800
1 000
1 200
VATTENFÖRING

Diagram 5.


TAPPNINGSPROV TRÄNGSLET
1989 – ackumulerde TE-samband
TE
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
TID – MINUTER
Q-TRÅNGSLET
Qt-ÅSEN
TRAPACK

YTUTSKOV TRÄNGSLET

Hydraulisk avbördningsförmåga.

Avser helt öppna luckor och magasinet vid dämningsgränsen. Utformning utan ledmur.

Teoretisk beräkning

Avbördningskoefficient för aktuell tröskelform	0,578
Korrektionsfaktor för sidokontraktion och sned inströmning	0,960
Korrektionsfaktor för gränsskiktsutveckling	0,985
Korrektionsfaktor för friktion	0,985
Avbördningskoefficient för utskoven	0,578 • 0,960 • 0,985 • 0,985 = 0,538

Beräknad avbördningskapacitet är således 858 m^3/s. Bedömd felmarginal +4/-7 %. Beräkningen* ger således en bedömd hydraulisk avbördningskapacitet av **798–892** m^3/s.

Matematisk modell
Avbördningskapacitet enligt modellberäkning är 855 m^3/s. Bedömd felmarginal med hänsyn till ofullkomlig inströmning i modellen samt ofullkomlig beskrivning av gränsskiktsutveckling, friktion mm ±4 %. Den matematiska modellen ger således en bedömd hydraulisk avbördningskapacitet av **821–889** m^3/s.

Fysisk modell
Avbördningskapacitet enligt mätning i modell är 876 m^3/s. Bedömd felmarginal ±2 %. Den fysiska modellen ger således en bedömd hydraulisk kapacitet av **858–894** m^3/s.

Provtappning
Provet gjordes med endast delvis öppna luckor och med väsentligt lägre tappningar. En extrapolering till helt öppna utskov med magasinet vid dämningsgränsen ger en avbördningsförmåga av storleksordningen 885 m^3/s. Felmarginalen kan kanske sättas till omkring ±10 %. Provtappningen ger således en bedömd avbördningskapacitet av **795–975** m^3/s.

*) *Vid provtappningen i Trängslet användes avbördningskurvor från 1985. Kurvorna anger avbördningsförmågan vid olika vattenstånd i en punkt i* ***kanalen uppströms luckorna, inte i magasinet****. Om fallförlusten mellan magasinet och "kanalen uppströms luckorna" uppskattas till 0,7 à 1,1 m motsvarar kurvorna en hydrauliska kapacitet av 790–845 m^3/s med magasinet vid dämningsgränsen.*

ANDRA PROVTAPPNINGAR VID SVENSKA DAMMAR

1. Blåsjön

Vid Blåsjöns regleringsdamm i Faxälven utfördes i oktober 1986 en provtappning med utskoven i syfte att verifiera den hydrauliska kapaciteten. Eftersom avbördningen påverkas av indämning nedströmsifrån registrerades vattenstånd under provtappningen både uppströms och nedströms.

Vattenföringen bestämdes med flera metoder. Dels utfördes flygelmätningar i en noggrant pejlad sektion några hundra meter uppströms dammen, dels registrerades vattenståndet vid en av SMHIs närbelägna peglar med en sedan tidigare ganska väl etablerad avbördningskurva. Provtappning avsågs utföras vid tre olika vattenföringar. Provtappningen var således väl planerad, men utfallet blev inte av förväntad kvalitet.

Under den första mätningen uppnåddes inte fortvarighetstillstånd, varför resultatet bedömdes som mindre användbart.

Vid den andra mätningen, som utfördes med en ganska hög vattenföring, kapsejsade det ena mätlagets båt, vilket bl a ledde till att wiren som var spänd över älven överbelastades och brast. Folk hamnade i vattnet och huvuddelen av resultaten från flygelmätningarna gick förlorade. Tvärsektionen vid SMHI's pegel vidgades under mätningarna genom erosion av en stenkista.

Den tredje mätningen gjordes vid en något lägre vattenföring och med decimerade mätresurser.

Bevarade mätresultat var endast ett tiotal flygelregistreringar av vad som bedömdes vara maximala strömningshastigheten i mätsektionen. Med ledning av dessa registreringar och tidigare flygelmätningar på samma plats uppskattades vattenföringen med en antagen noggrannhet av ±15 %.

Avbördningskurvan för SMHIs pegel kunde inte antas gälla vid mätning två och tre. Senare kontroller visar att en betydande vidgning av tvärsektionen skett under mätningarna. Vattenståndsmätningen nedströms utskoven var behäftad med relativt stora osäkerheter på grund av kraftiga svängningar och vågbildning.

Man nödgades därför trots allt bedöma utskovens avbördning under provet med hjälp av teoretiskt beräknad avbördning vid aktuella luckställningar och vattenstånd. Mätningarna gav således i realiteten endast en viss kontroll av beräknade samband mellan luckställning och vattenstånd uppströms/nedströms.

Utskovens maximala kapacitet vid dämningsgräns respektive vid viss överdämning har därefter beräknats teoretiskt på två sätt med delvis olika antaganden. Den lägre uppskattningen sägs vara gjord på basis av något konservativa men inte närmare redovisade antaganden. Skillnaden på uppskattningarna är ca 15–16 % och den verkliga kapaciteten antas ligga därimellan. Den lägre uppskattningen rekommenderas dock för användning. Med tanke på att tappning skedde samtidigt genom 8 olika öppningar med varierande luckställningar och att avbördningen i viss mån påverkades av indämning nedströmsifrån får felmarginalen antas vara betydande, möjligen större än antydda ±7,5 à 8 %.

2. Borga

Vid Borgadammen i Fjällsjöälven utfördes provtappning med **bottenutskoven** i oktober 1986.

Preliminära beräkningar enligt riktlinjerna visade att en total tappningskapacitet om ca 400 m^3/s skulle komma att behövas. Ytutskovet ansågs ha en avbördningskapacitet om ca 130 m^3/s. Bottenutskoven utgörs av två tuber med 4 m diameter belägna med hjässan ca 16 m under dämningsgränsen. Dimensioner och placering har ursprungligen valts för att möjliggöra förbiledning under byggnadstiden. Med fullt magasin uppströms är måtten mer än tillräckliga för att rent hydrauliskt medge erforderlig tappning. Avsikten med provtappningen var att undersöka om andra faktorer, t ex befintliga anordningar för energiomvandling hade tillräcklig kapacitet eller kunde tänkas påkalla oacceptabla restriktioner.

Energiomvandlaren utgörs av en betongklädd bassäng som är gemensam för båda bottenutskoven. Bassängen är ursprungligen dimensionerad för en sammanlagd avbördning av 200 m^3/s genom de två tuberna.

Tappningen genom bottenutskoven antas inte påverkas av vattenstånd på nedströmssidan. Under provtappningen registrerades sålunda i första hand vattenstånd i magasinet och aktuell luckställning.

SMHI har en pegel strax nedströms dammen. Denna pegels avbördningskurva har etablerats genom flygelmätningar vid 23 olika tillfällen med vattenföringar upp till 90 m^3/s. Spridningen i mätningarna gör att kurvan kan anses ge aktuell vattenföring i sitt övre registret med en noggrannhet av ± 5 à 10 %.

Vid provtappningen utfördes ytterligare flygelmätningar vid en vattenföring som bestämdes till ca 155 m^3/s. Sammanlagt gjordes då 65 registreringar av vattenhastigheten i 17 olika vertikaler. Varje enskild registrering med flygeln gjordes dock under kortare tid än normalt på grund av den begränsade totaltid som stod till buds. En bakeda vid ena stranden i mätsektionen bidrar också till att SMHI betraktar mätningen som något osäker. Med hjälp av dessa mätningar har avbördningskurvan förlängts till omkring 150 m^3/s. Noggrannheten vid vattenföringar av denna storlek torde inte vara bättre än ca ±10 %.

Den förlängda avbördningskurvan har tillsammans med uppgifter om aktuella luckställningar vid olika tillfällen använts för att skapa en avbördningskurva för utskoven. Kurvan har något förenklat förutsatts ha en konstant avbördningskoeffecient över hela tappningsregistret. Med tanke på underlaget kan man inte förvänta sig att kurvan skall ge en bättre noggrannhet vid höga flöden än ±10 à 12 %.

När anläggningen ursprungligen projekterades år 1951 utfördes hydrauliska modellförsök som även omfattade bottenutskoven. Beräkningar gjorda i samband med dessa försök anger ca 13 % lägre avbördning än nu framtagen kurva. Materialet har emellertid inte kunnat granskas när detta skrivs.

Vid provet ökades tappningen stegvis på ett sådant sätt att förutsättningarna för energiomvandlingen förvärrades eftersom nedströmsvattenytan inte hann stiga till fortvarighet-

stillstånd. Energiomvandlaren kunde belastas upp till 250 m^3/s utan att vattensprånget förflyttades ut ur bassängen, medan det vid 290 m^3/s låg delvis utanför. Vissa erosionsskador uppkom dock i kanalen nedströms bassängen redan vid 190 m^3/s. Energiomvandlaren kunde sålunda överbelastas kortvarigt utan alltför dramatiska konsekvenser, men energiomvandlingen försämrades, vattenhastigheterna nedströms steg och vissa erosionsskador uppkom. Med hänsyn till möjliga feluppskattningar kan den största provade tappningen i värsta fall ha varit så liten som 255 m^3/s. Provet utfördes med magasinsvattenytan avsänkt ca 1,5 m under dämningsgränsen, vilket torde ha inverkat gynnsamt på energiomvandlarens funktion. Med hänsyn till det lägre nedströmsvattenståndet under provet får man ändå bedöma att 260–270 m^3/s troligen kan tappas **kortvarigt** genom utskoven utan mer omfattande skador. Emellertid bör energiomvandlaren granskas konstruktivt så att risken för t ex vibrationer (utmattning) eller lyftning kan bedömas. Energiomvandlarens tekniska kapacitet kan vara lägre än dess hydrauliska.

Vid tappning med helt eller nästan helt öppna luckor kan risk för vibrationer och kavitationsskador finnas i kulverterna, varför luckornas möjliga öppning ur denna synpunkt bör begränsas till omkring 300 m^3/s. Bottenutskoven skyddas av vrakgrindar uppströms kulvertintagen. Dimensioneringskriteria för grindarna och kapaciteten hos rensningsanordningarna bör måhända granskas. Risker för igensättning.

Ytutskovet i Borga provades i oktober 1988 efter att ombyggnad av kanalen skett på nedströmssidan. Den äldre flottningskanalen innebar kraftiga begränsningar i den tillåtna tappningen genom ytutskovet p g a erosionsrisk och dessutom eventuellt viss indämning av utskovet. Efter ombyggnad av kanalen utfördes provtappning med helt öppen lucka men något avsänkt magasin. Enligt SMHIs pegel uppgick vattenföringen till 116 m^3/s. Viss erosion förekom. Med oförändrad avbördningskoeffecient blir avbördningsförmågan med magasinet vid 147 m^3/s. Felmarginalen i denna uppskattning torde vara omkring ±10 %, i huvudsak beroende på osäkerheter i avbördningskurvan för SMHI´s pegel.

3. Porjus

Porjus är utbyggd i etapper med början på 1910-talet. En om- och tillbyggnad startade 1971 som innebar att två nya aggregat tillkom samt att en ny damm med nya utskov byggdes. De nya utskoven har en hydraulisk avbördningsförmåga enligt modellförsök på nära 2 000 m^3/s vid dämningsgräns +372 m.

Den första provtagningen gjordes 1975-08-21 med 240 m^3/s som högsta vattenföring. Begränsningen i vattenföringen kom från de två provisoriska broar som låg nedströms utskoven. Dokumentation finns endast i form av en serie fotografier och inget anmärkningsvärt finns att notera. En ny provtappning gjordes 1981-10-20 som dokumenterades på liknande sätt som den tidigare med foto, men även med videofilm. Den maximala vattenföringen var vid detta tillfälle 1 000 m^3/s.

Syftet med denna provtappning var bl a att se om ställverksplanen med transformatorbyggnaderna på höger sida strax nedströms utskoven klarade sig från översvämning och erosion.

Fotografierna och videon visar en kraftigt luftinblandning i vattnet i energiomvandlaren och

en pulserande, mycket orolig vattenyta. På grund av luftinblandningen sväller vattnet och når upp på ställverksplan och fundamenten på en högspänningsledning. Vattnet når dock inte till transformatorbyggnaderna.

Provtappningen visar att utskoven kan avbörda 1 000 m^3/s utan problem d v s halva den hydrauliska avbördningsförmågan. Provtappningen visar också att det finns risk för översvämningar vid högre tappningar än 1 000 m^3/s. Vid modellförsöken har man inte tagit hänsyn till skaleffekten där man i prototypen får en betydligt kraftigare luftinblandning i vattnet i energiomvandlaren med högre vattenstånd som följd.

4. Suorva

Suorva-magasinet har byggt ut i etapper med början i 1920-talet. Suorvas fjärde reglering genomfördes under åren 1969–1971. De utskovsmöjligheter som finns är två bottenutskov med lucköppning 6 x 8 m (B x H) med en tröskelhöjd 20,5 m under dämningsgräns +453 m. Hydraulisk avbördningsförmåga enligt modellförsök är 1 260 m^3/s. Ytterligare ett djupare liggande bottenutskov finns men användbarheten av detta utskov kan diskuteras.

Från början utfördes en kort bergkanal från de ordinarie utskoven till strax förbi en landsvägsbro. Vattnet skulle vid tappning få rinna fritt ut över området nedströms bron. På grund av att lapplägret fick sin permanenta placering nedanför östra dammen kunde man endast tappa 230 m^3/s enligt en provtappning 1974 för att ej skada bebyggelsen.

För att klara högre tappningar utfördes under 1976 en skyddsvall på vänster sida. Målet var att klara 500 m^3/s. Efter en provtappning kompletterades vallen och vid en annan provtappning 1979-08-07, konstaterades att målsättningen var uppfylld. Ett skäl till att begränsa utskovstappningen till 500 m^3/s var att vid högre vattenföringar översvämmades vägen mellan Stora Sjöfallet och Suorva på fem delsträckor.

Efter Suorvaincidenten 1983 omprövades målsättningen om maximalt möjlig tappning till att gälla full utskovstappning 1 260 m^3/s utan skador. Under 1988–89 förlängdes och fördjupades kanalen genom utsprängning i nedre delen. En provtappning genomfördes 1989-08-15 för att se om målsättningen uppfyllts.

Från denna provtappning finns fyra olika rapporter. I en rapport konstateras att utskovskanalen nu klarar full utskovstappning 1 260 m^3/s. Vid provtappningstillfället kunde enligt avbördningskurvan endast 1 160 m^3/s tappas. Begränsningen orsakades av att luckorna inte kunde öppnas för fullt på grund av en felaktigt installerad kabelstege i luckkammarens tak men det bedömdes att utskovskanalen gott och väl klarar 1 260 m^3/s. I rapporten finns fotografier vid fyra olika vattenföringar. Provtappningen har också videofilmats.

I en besiktningsrapport upprättad efter provtappningen konstateras omfattande erosionsskador på bergkanalen enligt följande citat;

"Skador på bergkanalen har i huvudsak orsakats av samverkan av tre svaghetselement i berget, nämligen ett antal flackt liggande krosszoner (små överskjutningar) som stupar drygt 20 grader mot utskovet, och två nästa vertikala spricksystem, det ena mer eller mindre

längs kanalen och den andra tvärs den".

"Kanalens botten är mycket ojämn, med upp till 2–3 m höga trappsteg. Nedströmssidan av dessa är vertikal och uppströmssidan lutar med ca 20 grader. Dessa trappsteg förflyttar sig troligen mot uppströms".

"Det finns två betongtröskler nedströms skiborden. Den nedersta av dessa håller på att brytas sönder i mitten, där en ca 3 m djup grop förflyttats uppströms. Den andra tröskeln håller på att rivas upp på vänster sida. På höger sida har berget under och över den översta tröskeln urholkats till ca 1 m djup. En utskjutande bergklack håller på att brytas sönder. Det förekommer omfattande skador och urgröpningar i väggarna. De största urgröpningarna finns i anslutningar till bra berg och tidigare utförda bergförstärkningar. En urgröpning som är max ca 3 m hög, 3 m djup och ca 10 m lång iakttogs i högra sidan. På vänstra sidan är den största urgröpningen max 2 m djup, 1,5 m hög och ca 10 m lång. Dessutom finns flera mindre urgröpningar i båda sidorna även nära utskovet. Det kunde konstateras skador i sprutbetongsförstärkta bergpartier på båda sidor omedelbart nedströms utskovet. Högra brofundamentet är urgröpt på uppströmssidan och det vänstra på nedströmssidan".

Vid SWEDCOLD's temamöte 18–19 april 1991, presenterades en rapport om skadorna och om de förstärkningsåtgärder som har utförts. I sammanfattningen konstateras att om provtappningen med högvattenutskovets fulla kapacitet genomförts vid anläggningens idrifttagning, hade sannolikt kanalens svagheter upptäckts och varit möjliga att åtgärda till en betydligt lägre kostnad.

En annan reflektion är osäkerheten om vad som skulle kunna hända om utskoven måst öppnats för fullt i en eller flera veckor för att klara en extrem flödessituation. Nu var utskoven öppna endast i någon timme med omfattande skador som följd.

Efter provtappningen ifrågasattes avbördningskuvorna för utskoven i Suorva. Bakgrunden var att vattenståndshöjningen i Langas inte blev så stor som förväntat med tanke på de volymer som spilldes. Enligt vattenståndshöjningen kunde maximal utskovstappning vara endast 900 m^3/s i stället för 1 160 m^3/s som avbördningskurvorna visade. Svagheten med denna i efterhand rekonstruerade flödesmätning är bl a tidregistreringen av luckornas olika öppningar, nivåmätningen i Langas och avbördningskurvan för Kårtejaure som är flygelmätt med ett högsta värde på 650 m^3/s.

Denna flödesmätning har en alltför stor osäkerhet för att vara användbar. Avbördningskurvorna för Suorvas utskov är framtagna i modell i skala 1:40 vilket torde innebära en noggrannhet bättre än ±5 %.

5. Harsprånget

Harsprånget har tre utskov vardera 20 m breda med en hydraulisk avbördningsförmåga på 2 300 m^3/s vid dämningsgräns +312,70 m. Utskoven är av samma konstruktion som i Ligga och modellförsök för Ligga kraftverk ligger till grund för avbördningsdiagrammet för Harsprånget.

En provtappning vid Harsprånget genomfördes 1980-09-10. Syftet var att avgöra om ytterligare ledmur krävdes för att leda vattnet ned till älvfåran utan att erosion uppkommer

i släntutfyllnaden som gjorts på dammen mitt för älvfåran.

Den maximala utskovsvattenföringen var 1 050 m^3/s under provtappningen och i rapporten från provtappningen, bedöms att "Den bergskreva som avleder vatten från nedre ledmurens ände är mycket effektiv och bedöms tillåta en tappning uppåt 1 500 m^3/s innan betydande vattenkaskader spolar över och upp på släntlutningen som vetter mot fallen".

En kommentar till provningen är att man nöjer sig med ett flöde som är 46% av den hydrauliska kapaciteten i provtappningen och bedömer att flödet kan öka till 65% innan man får icke acceptabla skador.

Vid provtappningen bröts ett uppskattningsvis 70 ton tungt stenblock loss och ställde sig på högkant vid övre ledmurens nedre ände. Händelsen visar att man måste ta problemet med erosion i berg på allvar.

6. Letsi

Letsi har två 15 m breda luckor med en hydraulisk avbördningsförmåga enligt modellförsök på 1 560 m^3/s vid dämningsgräns +214 m.

En provtappning utfördes 1967-06-01. Maximal avbördning i vänster utskov uppgick till 550 m^3/s i höger utskov 740 m^3/s och för båda utskoven tillsammans 700–800 m^3/s enligt en rapport daterad 1967-08-17. I rapporten konstateras att "Strömningsbilden i utskovskanalen och energiomvandlaren stämmer mycket bra med modellen, bortsett från den tendens till vattenkastning på vänster sida som uppkommer på grund av att strålens kant träffar bergkanten strax nedströms vänster ledmurs avslutning. Denna avvikelse beror med största sannolikhet på att utsprängningen inte stämmer helt med modellen". Den omtalade vattenkastningen orsakade erosion på dammslänten och var en av orsakerna till att provtappningens flöde begränsades.

En ny provtappning genomfördes 1986-06-19 men den avbröts vid 380 m^3/s då en luckwire var så skadad att man inte vågade fortsätta provet. Provet genomfördes sedan 1987-10-23 med samma syfte som tidigare nämligen att undersöka risken för erosion i kraftverksdammens släntfot samt risken för att vatten rinner ner i tillfartstunneln vid utskovstappning. Det har visat sig att vid utskovstappning kommer vatten upp på plan i anslutning till tillfartstunneln till maskinhallen och inget hindrar detta vatten att rinna ner i tillfartstunneln. Med hänsyn till denna risk begränsades utskovstappningen till 1 000 m^3. Dessutom provades 500 m^3/s i höger respektive vänster utskov. Tveksamhet finns om den hydrauliska kapaciteten på 1 560 m^3/s kan utnyttjas om inte detta visats i en provtappning.

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tillflöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvad säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (bl a verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från:
ELFORSK
101 53 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 677 25 30
Telefax: 08 - 677 25 35