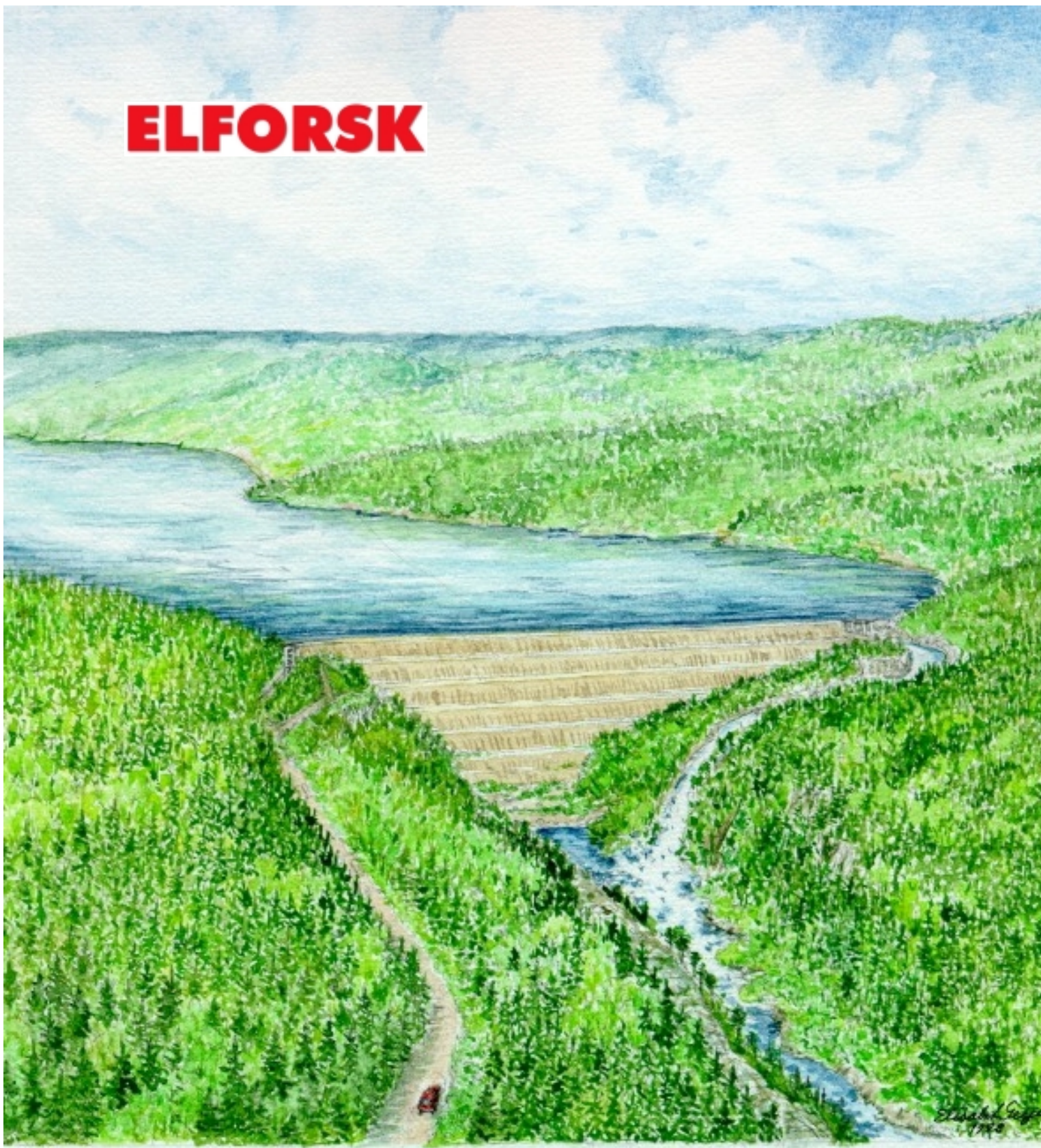


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

SAMARBETE MELLAN BC HYDRO OCH ELFORSK 1997 –
1999

SAMMANFATTNING

Rapport 00:03

DAMMSÄKERHET

SAMARBETE MELLAN BC HYDRO OCH
ELFORSK 1997 – 1999
SAMMANFATTNING

Elforsk rapport 00:03

DAMMSÄKERHET

SAMARBETE MELLAN BC HYDRO OCH
ELFORSK 1997 – 1999
SAMMANFATTNING

Elforsk rapport 00:03

Gunnar Sjödin

VATTENREGLERINGSFÖRETAGEN

UMEÄLVEN ÄNGERMANÄLVEN INDALSÄLVEN LJUNGAN LJUSNAN

Förord

BC Hydros W.A.C. Bennett damm i British Columbia, Canada, är en 183 m hög och ca 2000 m lång jorrdamm som dämmer upp en ca 30 mil lång sjö med en regleringsvolym av 70 miljarder m³ vatten.

Två sjunkgropar uppstod under juni respektive september 1996 i Bennett-dammen. Man beslöt tillsammans med delstatens dammsäkerhetsmyndighet att magasin snivån omedelbart skulle sänkas. Därefter startade omfattande undersökningar av dammen både med mer beprövade metoder samt med nyare metoder som ligger i forskningens framkant.

Hösten 1996, i anslutning till det inträffade, beslöts det att ett utvecklingssamarbete skulle starta mellan BC Hydro och svensk kraftindustri med inriktning på dammsäkerhetsfrågor kopplade till inre erosion, sjunkgropar och reparationsmetoder.

Utvecklingssamarbetet har varit mycket givande för båda parter. Det var ett unikt tillfälle att direkt kunna få tillgodogöra sig resultatet av mycket omfattande utrednings-, undersöknings- och FoU-insatser på högsta internationella nivå.

Denna rapport utgör en sammanfattning av detta samarbete mellan BC Hydro och svensk kraftindustri. I samarbetet har Urban Norstedt, Vattenfall Vattenkraft, och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen, utgjort styrgrupp för VASO Dammkommitté och kraftindustrin och finansierande företag har varit alla medlemmar i Svenska Kraftverksföreningen.

Östersund i december 1999

VASO Dammkommitté

Elforsk AB

Sammanfattning

Med anledning av den incident som inträffade i Bennett-dammen sommaren 1996 startades ett samarbete mellan BC Hydro och svensk kraftindustri. Denna rapport utgör en sammanfattning av detta samarbete.

I rapporten lämnas lite bakgrundsinformation om BC Hydro samt om Bennett-dammen och händelseutvecklingen kring de sjunkgröpar som uppstod i dammen sommaren 1996.

Vidare redogörs för samarbetet mellan BC Hydro och på den tiden VASO (har upphört och sköts numera av Elforsk) från starten 1997 på samarbetet fram till den workshop som hölls i Vancouver i maj 1999.

Under arbetets gång har ett antal rapporter tagits fram som kortfattat redovisas.

”Minutes of meeting” från workshop i Vancouver bifogas.

Utvecklingssamarbetet har varit mycket givande för båda parter. Det var ett unikt tillfälle att direkt kunna få tillgodogöra sig resultatet av mycket omfattande utrednings-, undersöknings- och FoU-insatser på högsta internationella nivå.

De omfattande undersökningarna av dammen både med mer beprövade metoder samt med nyare metoder som ligger i forskningens framkant, är förmodligen de mest omfattande som hittills gjorts på någon damm i världen.

Summary

During the summer in 1996 two sinkholes occurred in the Bennett Dam in British Columbia, Canada and in connection with this incident a cooperation started between BC Hydro and Swedish Hydro Power Industry (through VASO). This report is a summary of this mutual research and development program, which has been going on since December 1996.

In this report some facts about the company BC Hydro and the Bennett Dam are given and the incident with the sinkholes is also briefly described.

During these years a number of reports have been produced which are briefly described.

In May 1999 a workshop was held in Vancouver as a summary of the cooperation so far. The minutes of meeting from this workshop are attached.

The cooperation has been very stimulating and useful for both parties. It has been a unique possibility to take part in a very comprehensive research-, and development effort on the highest international level.

The investigations for Bennett Dam, both with old and new investigation techniques, are probably the most comprehensive that have been performed on any dam in the world. Sweden and Swedish Dam business are very grateful to BC Hydro for this chance to cooperation and fruitful contacts even for the future.

A special word of thanks to our friends Al Imrie, Ray Stewart and Gary Salmon; BC Hydro.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	MÅL	1
2	OM BC HYDRO OCH BENNETT DAM	2
2.1	BC HYDRO	2
2.2	BENNETT DAM	2
3	SAMARBETETS FORM.....	7
4	SVENSKA RAPPORTER	9
4.1	ALLMÄNT.....	9
4.2	SAMMANFATTNING AV SVENSKA RAPPORTER.....	10
5	BC HYDRO RAPPORTER	17
6	SLUTSATSER	18
7	REFERENSER.....	19

Bilagor

- A BC HYDRO VASO WORKSHOP – AGENDA**
- B BC HYDRO – VASO WORKSHOP MINUTES OF MEETING**

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Mot bakgrund av de sjunkgropar som inträffade i Bennett-dammen startades ett samarbete mellan BC Hydro och svensk kraftindustri, genom VASO (Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan) i december 1996. Detta samarbete är beskrivet i följande rapport.

1.2 Mål

Målet med samarbetet har varit att öka förståelsen för utvecklingsmekanismer för inre erosion och sjunkgropar samt att hitta bra reparationsmetoder och övervakningsutrustning. Vidare har målet varit att skapa en bra relation och nyttiga kontakter för framtiden med ett företag som är mycket aktiv i dammsäkerhetsfrågor samt att samtidigt höja kompetens och engagemang bland svenska ingenjörer, forskare och beslutsfattare.

2 Om BC Hydro och Bennett Dam

2.1 BC Hydro

BC Hydro är det tredje största kraftföretaget i Kanada. De servar ca 1.5 miljoner kunder i ett område som motsvarar över 94 % av British Columbias befolkning. Mellan 43 000 och 52 000 GWh av elektricitet produceras årligen varav ca 75 % kommer från vattenkraft.

Mer information om BC Hydro finns på deras hemsida, <http://eww.bchydro.bc.ca/>.

2.2 Bennett Dam

2.2.1 Allmänt

W.A.C. Bennett damm i British Columbia är belägen i Peace River, på östra sidan av Klippiga bergen. Peace River rinner sedan norrut med sitt utlopp i Ishavet, se **figur 1**.



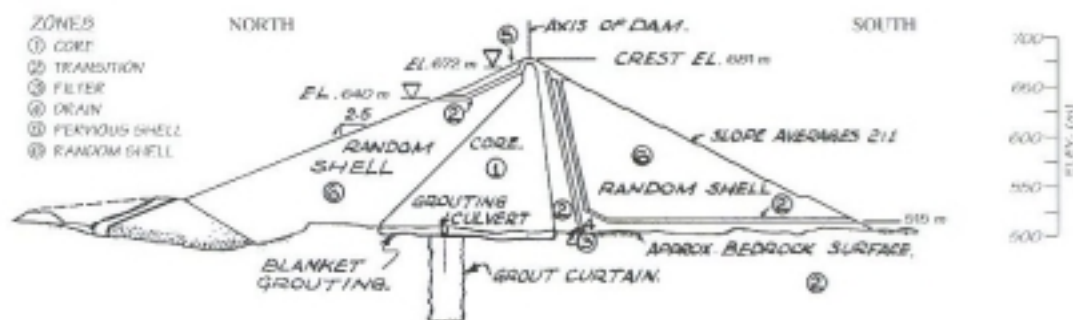
Figur 1 Nord-Amerika Bennett Dam

Bennett-dammen är en 183 m hög och ca 2000 m lång jorrdamm som dämmer upp en ca 30 mil lång sjö med en regleringsvolym av 70 miljarder m³ vatten. Dammen byggdes i början av 1960-talet. Dammen visas i **figur 2**.



Figur 2 Bennett Dam

Dammen är en jordfyllnadsdamm med en central tåtkärna av morän, se **figur 3**.



Figur 3 Bennett Dam – Sektion genom dammen

2.2.2 Sjunkgropar

Den 14 juni 1996 uppstod ett hål i asfaltbeläggningen på dammens krön. Diametern var ca 50 cm. Hålet upptäcktes bara några timmar efter en detaljerad halvårsinspektion som ej rapporterat något onormalt. En första undersökning visade att hålet var ca 1.2 m djupt med en diameter på ca 2 m, se **figur 3**.



Figur 4 Bennett Dam – Sjunkgrop i krön på dammen

Dammen är ca 115 m hög vid denna sektion. För att undersöka skadan startade man att borra med den så kallade Becker-metoden varvid en ytterligare 6 m djup sättning med en diameter på ca 2.5 m uppstod.

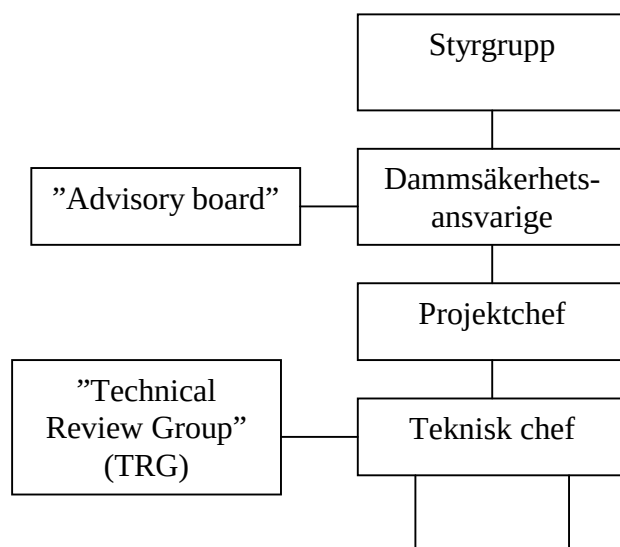
I samband med undersökningarna upptäcktes en ytterligare sjunkgrop i början av september 1996, ca 500 m från den första sjunkgropen.

2.2.3 Projektorganisationen

BC Hydro visade redan i ett tidigt skede att man såg allvarligt på det inträffade, vilket avspeglades i den kraftfulla insatsen för att bedöma och åtgärda skadan. På plats fanns inom kort en stab från BC Hydro samt ca 30 konsulter och tekniker.

Förutom staben på plats bildades ett team som bestod av oberoende experter för att syna allt arbete och lämna synpunkter och slutsatser på arbetets gång. Detta team bestod av ett par man och kallades "Advisory board" och sammanträffade ca en gång/månad och utgjorde i första hand ett stöd för den dammsäkerhetsansvarige inom BC Hydro.

Dessutom bildades ett team som kallades Technical Review Group (TRG) som ej heller deltog i det dagliga arbetet utan sammanträffade även de ca en gång/månad. Detta team utgjorde ett stöd och bollplank för den tekniske chefen på plats i första hand, se **figur 5**.



Figur 5 Projektorganisation för undersökning av sjunkgröpp

En stor satsning gjordes också för att informera såväl allmänheten som massmedia. Bland annat informerade BC Hydro via Internet varje dag om händelseutvecklingen när det var som intensivast.

Man beslöt tillsammans med delstatens dammsäkerhetsmyndighet att magasinsnivån omedelbart skulle sänkas. Därefter startade omfattande undersökningar av dammen både med mer beprövade metoder samt med nyare metoder som ligger i forskningens framkant. Dessa undersökningar är förmodligen de mest omfattande som hittills gjorts på någon damm i världen. Det man imponeras av är framför allt de resurser som satts in med kort varsel, den höga ambitionsnivån samt den förutsättningslösa attityden både vid analys och konsekvensbedömning. Värdefulla erfarenheter har därigenom erhållits både beträffande undersökningsmetodik och olika metoders användningsområden och mätkvalitet.

2.2.4 Undersökningar

Fyra olika borrhäns- och undersökningsmetoder användes; Becker Drill, Barber Drill Large Auger Drill och Cone Penetration Test. Totalt borrades över 100 hål.

Ett flertal geofysiska metoder användes som seismik, georadar, resistivitet och självpotential. Både oförstörande undersökningar från ytan liksom borrhålsbaserade metoder användes. Det bästa resultatet erhöles från cross-hole seismik.

De undersökningar som gjordes av dränagematerialet visade på ett förhöjt innehåll av silt och sand. Man bestämde därför att göra ett fullskaligt infiltrationsförsök i dräneringslagret vilket är unikt i världen. Det största flöde som infiltrerades var ca 1000 l/s.

2.2.5 Reparation och kontroll

Inför åtgärdandet av sjunkgroparna har de tillgängliga metoderna för injektering utvärderats. Den metod som framstod som mest lämplig var kompakthinjektering. Denna metod går ut på att genom nedborrade injekteringsrör pumpa in en styv injekteringsmassa under relativt högt tryck i tät kärnan varvid man både tillför nytt material samt packar den omkringliggande jorden. Denna metod har inte använts tidigare för reparation av fyllningsdammar.

Ett system för automatisk datainsamling av läckage- och tryckmätningar började installeras under 1989. I samband med sjunkhållet ökade man på antalet mätpunkter och för närvarande är ca 130 mätinstrument anslutna till systemet. Mätningarna övervakas kontinuerligt av driftpersonal som också har möjlighet att följa händelseutvecklingen via TV-monitorer. De parametrar som mäts för närvarande är läckage, tryck, temperatur och turbiditet.

Arbetet på plats tog upp till ett år att genomföra inklusive undersökningar och reparationer.

3 Samarbetets form

Samarbetet mellan BC Hydro och Sverige har bedrivits genom att vissa ämnen föreslagits av BC Hydro och andra av VASO, se **tabell 1**.

Föreslagen av:	Item nr:	Ämne:
BC Hydro	1	Concentrated Flow through Dams
BC Hydro	2	Monitoring of Sinkhole Formation
BC Hydro	3	Internal Erosion/Particle Mitigation through Earth Dams
BC Hydro	4	Remedial Measures for Dealing with Anomalous Soil Movement and Water Flow
BC Hydro	5	Monitoring Drainage Efficiency and Total Seepage
BC Hydro	6	Wetting/Settlement Testing
BC Hydro	7	Air Saturation Theory
VASO	A	Review of Dams with Reported Sinkholes
VASO	B	Analyses of Stresses in two Dams
VASO	C	Concentrated Flow through Dams
VASO	D	Downstream Stability of Embankment Dams
VASO	E	Remedial Measures
VASO	F	Summarizing experience with different remediation methods
VASO	G	Long Term Monitoring
VASO	H	Workshop
VASO	I	Stability of Swedish Moraines against Internal Erosion
VASO	J	Messaure Dam – Documentation and Follow Up of Sinkhole in 1963
VASO	K	Lövön Dam – Documentation
VASO	L	Lövön Dam – Temperature Measurements with Optic Fibre Technique

Tabell 1 Ämnesområden i samarbetet mellan BC Hydro och VASO

Utvecklingsarbete har sedan bedrivits kring dessa ämnen på respektive håll och erfarenheter har sedan utbytt. BC Hydro's arbete har hela tiden haft anknytning till Bennett-dammen eftersom det har varit så omfattande undersökningar där.

Utbytet har främst skett via telefonmöten (ca 10 st), där anteckningar förts. Vidare har representanter från både Sverige och Kanada besökt respektive land vid ett par tillfällen. Nedan i **figur 6** är två av våra samarbetspartners från BC Hydro försjunkna i något problem.



Figur 6 BC Hydro samarbetspartners – Ray Stewart och Al Imrie

Som en sammanfattning och avrundning på vårt samarbete så här långt anordnades en workshop i Vancouver under maj 1999. I **Bilaga A** visas agendan för denna workshop samt i **Bilaga B** "Minutes of Meeting" från detta möte. Dessutom finns en omfattande dokumentation av alla föredrag hos deltagarna i workshopen.

4 Svenska rapporter

4.1 Allmänt

I detta samarbete har följande rapporter tagits fram från svensk sida.

Elforsks Damsäkerhetsrapport	Författare	Rapport Nr
Echo sounding technology for inspection of earth- and rockfill embankment dams	Roger Östberg, SwedPower AB	99:27
Comparative Evaluation of CFX and PHOENICS Codes in Modelling Flow in Porous Media	James Yang, Bengt Hemström Vattenfall Utveckling AB	99:49
Sammanställning av Undersökningar vid W.A.C. Bennett dam, Canada	Sam Johansson, HydroResearch Sam Johansson AB	97:31B
Reserapport, Bennett Dam, BC Hydro, Canada – Teknikbevakning av injekterinsarbeten	Pär Hansson, Vattenfall Utveckling AB	99:37
Inre erosion i svenska dammar – beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar	Åke Nilsson, Ingvar Ekström, SwedPower AB, Carl-Olof Söder, VBB Anläggning AB	99:34
On the non-Linear pressure Distribution in Embankment Dams – A first step towards a numerical simulation model	Urban Svensson, Computer-aided Fluid Engineering AB	99:47
Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion	Åke Nilsson SwedPower AB	99:33
Messauredammen - Dokumentation samt uppföljning av sjunkhål 1963	Maria Bartsch J&W Vattenbyggnad	99:9
Dokumentation och undersökning av skador i Lövödammen, examensarbete	Joacim Ericsson, Mattias Jender, Examensarbete Luleå Tekniska Universitet	
Fibre Optic System for Temperature Measurements at the Lövön Dam	Sam Johansson, HydroResearch Sam Johansson AB	99:36
Brottförlopp vid genomströmning av en fyllningsdamm	Åke Nilsson, Yanting Chang, Nils Johansson, SwedPower AB	00:10

Dessa rapporter går att beställa hos Elforsk, för mer upplysningar se deras hemsida

<http://www.elforsk.se>.

4.2 Sammanfattning av svenska rapporter

Nedan följer en kort sammanfattning av ovan nämnda svenska rapporter.

4.2.1 Echo sounding technology for inspection of earth- and rockfill embankment dams

Med denna teknik kan man upptäcka eventuella inhomogeniteter i uppströmsslänten på en damm.

I rapporten beskrivs tester som utförts på Messaure-dammen vid två tillfällen under 1996 med en ny utrustning för ekoljudsmätningar (multi beam system). Teknikens noggrannhet och repeterbarhet utvärderas.

4.2.2 Comparative Evaluation of CFX and PHOENICS Codes in Modeling Flow in Porous Media

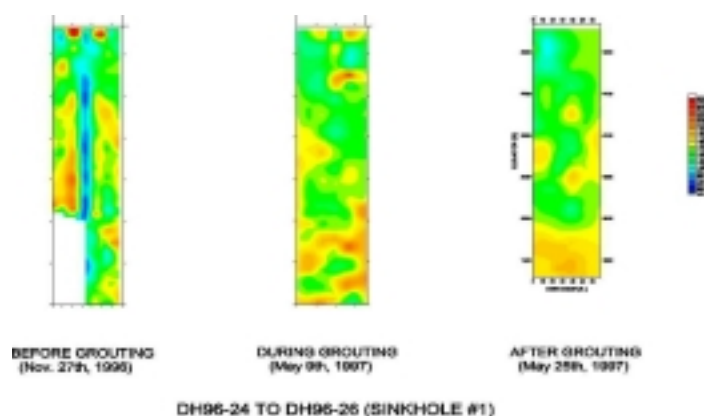
Jämförelse har utförts mellan två kommersiella program, CFX och Phoenix, för att studera vilket program som är mest lämpat för simulering av laminär strömning i ett poröst medium. I undersökningen studerades en rektangulär damm med homogena materialegenskaper. I jämförelsen erhöles nästan identiska resultat med de två programmen men CFX rekommenderas eftersom det är mer användarvänligt och även kan beakta turbulenta flöden genom ett poröst medium.

4.2.3 Sammanställning av undersökningar vid W.A.C. Bennett dam, Canada

Rapporten utgör en reserapport från besök vid Bennett-dammen och en sammanfattning av de undersökningar som utfördes på dammen med anledning av de sjunkgropar som uppstod.

I rapporten beskrivs bl.a. borrhinar och sonderingar, geofysiska undersökningar, övervakningsprogram samt kontroll av dränagekapaciteten.

Nedan i **figur 7** visas resultat på tomografianalys av cross-hole mätningar i dammen.



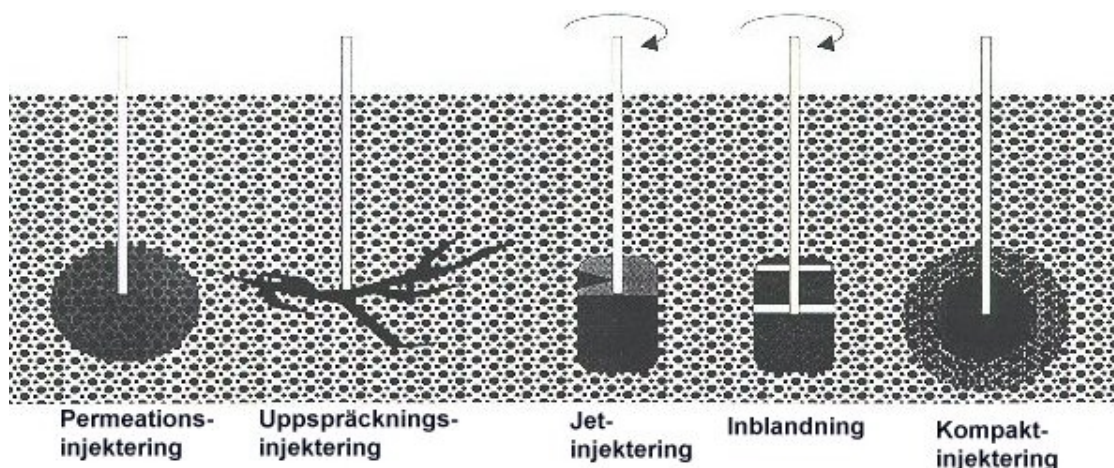
Figur 7 Bennett Dam – Exempel på tomografianalys från cross-hole mätningar. Ju varmare färg desto högre ljudhastighet och fastare material.

4.2.4 Reserapport, Bennett Dam, BC Hydro, Canada – Teknikbevakning av injekteringsarbeten

I denna reserapport beskrivs de olika reparationsåtgärder som övervägdes samt lite närmare om kompaktinjektering som slutligen valdes som injekteringsmetod. Denna metod har inte tidigare använts för reparation av fyllningsdammar, ej heller har den använts på så stora djup.

Metoden går ut på att genom nedborrade injekteringsrör tillföra nytt jordmaterial som pumpas in under relativt högt tryck samtidigt som den omkringliggande jorden packas.

I **figur 8** visas de injekteringsmetoder som brukar användas.



Figur 8 Injekteringsmetoder

4.2.5 Inre erosion i svenska dammar – beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar

Vid en inventering av svenska dammar har tidigare framkommit att för ca trettio st har sjunkgropar rapporterats. Denna rapport har som mål att få fram gemensamma förhållanden och omständigheter för dessa sjunkgropar. En systematisk genomgång av uppgifter om dessa dammar har genomförts.

I rapporten konstateras att i de flesta av fallen med sjunkgropar bedöms orsaken vara inre erosion i dammkroppen eller undergrunden. Orsaken bedöms bero på otillfredsställande projektering eller byggande. I de flesta av fallen kan samband noteras med otillräcklig filterverkan.



Figur 9 Sjunkgrop – Grundsjöarna

4.2.6 On the non-linear pressure Distribution in Embankment Dams – A first step towards a numerical simulation model

Bakgrunden till denna rapport är att i många dammar har uppmätts högre portryck i tåtkärnan än förväntat. T.ex i Bennett-dammen fortsatte portrycken att stiga i tåtkärnan de första tre åren efter att magasinet var fyllt. Efter dessa tre år startade portrycken att sjunka och nådde förväntade nivåer först efter tjugo år. En teori är att detta beror på att luft stängs inne i samband med dämningen i form av luftbubblor.

I rapporten beskrivs ett försök att åskådliggöra detta med en matematisk/numerisk modell av luftteorin enl St-Arnaud (1995). Programmet Phoenix har använts i en endimensionell betraktelse.

4.2.7 Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion

Målet med rapporten är att öka förståelsen för förutsättningarna för inre erosion. Bennett- dammen är uppbyggd med en tät kärna av liknande material som tät kärnor av morän i svenska dammar. Moränens egenskaper med avseende på risk för inre erosion, förmåga till självläkning och inverkan av nedströmsfiltrets kornfördelning har på senare år varit under diskussion för svenska dammar också.

I rapporten presenteras nya utländska erfarenheter om inre erosion i fyllningsdammar, vilka bedöms kunna tillämpas på svenska förhållanden.

4.2.8 Messauredammen - Dokumentation samt uppföljning av sjunkhål 1963

I samband med dämningssupptagningens slutfas 1963 uppstod två sjunkhål i dammkrönet i Messauredammen. I rapporten beskrivs skadeförloppet, gjorda observationer och undersökningar samt en bedömning av orsak till sjunkgroparna.



Figur 10 Sjunkgrop i Messauredammen 1963

4.2.9 Dokumentation och undersökning av skador i Lövödammen, examensarbete

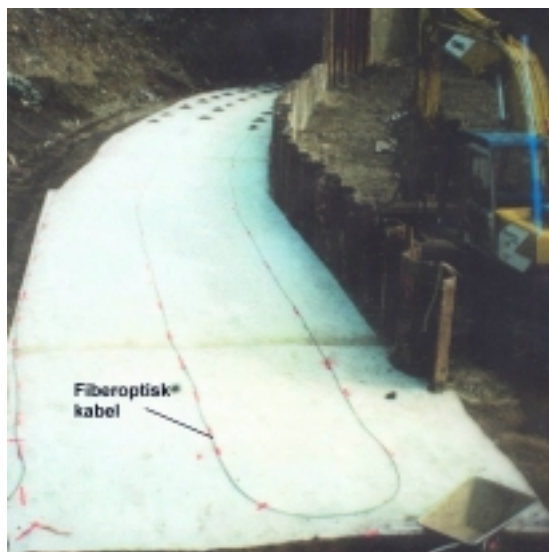
I Lövödammen uppstod sjunkgropar 1983 och 1986. Omfattande undersökningar har efter upptäckterna genomförts i och omkring det skadade området. Undersökningarna indikerade att inre erosion skett i tätkärnan och därför fattades 1997 beslutet att bygga om delar av dammen. I samband med utgrävningen dokumenterades alla upptäckter i dammen. Dessa redovisas i rapporten.



Figur 11 Lövön – Ett fynd inte inne i dammen men väl i den torrlagda kanalen

4.2.10 *Fibre-Optic System for Temperature Measurements at the Lövön Dam*

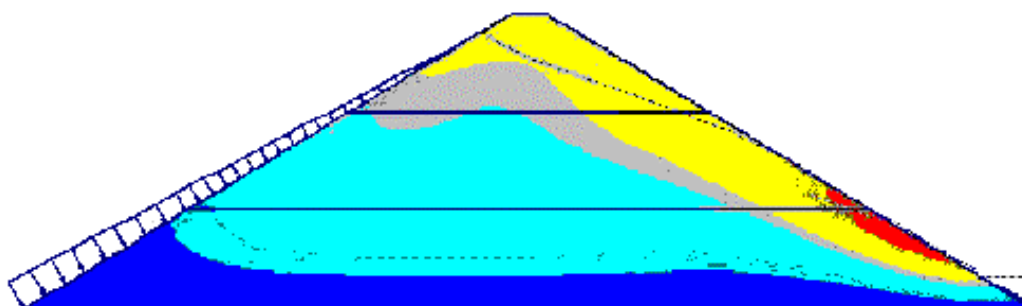
I samband med ombyggnaden av Lövödammen installerades bl.a optiska kablar i dammen avsedda för att kunna mäta temperaturen i dammkroppen. Installationen vid lövöns kraftverk är unik. Fiberoptiska kablar omger tätkärnan på olika nivåer utmed en slängd av upp till 100 m. Sammanlagt finns ca 1750 m kabel i dammen. I rapporten beskrivs installationen och en första utvärdering av mätresultaten.



Figur 12 Lövön – Installation av fiberoptisk kabel i dammen

4.2.11 *Brottförlopp vid genomströmning av en fyllningsdamm*

För en fyllningsdamm finns många olika brottförlopp t ex om inre erosion börjar i tätkärnan som resulterar i läckage vilket ger erosion i nedströms dammtå där vattnet strömmar ut. Risken för fortsatt brottförlopp bedöms vanligen från faktorer som bestämmer erosionsrisken, dvs utströmmande vattenflöde, stenstorlek för "tåstenen" och lutningen på nedströmsslänten. I denna rapport presenteras möjligheten för att läckaget leder till ett annat brottförlopp (utglidning), där brottförloppet bestäms av friktionsvinkeln hos fyllningsmaterialet, släntlutningen och porvattentrycket i fyllningen. Fysiska modellförsök samt matematiska beräkningar med finita elementmetoden jämförs i rapporten. Nedan i **figur 13** visas resultaten av en beräkning med FEM-programmet Plaxis.



Figur 13 Konturer för olika deformationer

5 BC Hydro rapporter

I skrivande stund pågår fortfarande ett intensiv sammanställning av undersökningar, åtgärder och övervakningsprogram för Bennett-dammen. Många av dessa rapporter kommer att distribueras på CD i en nära framtid. Dessutom kommer flera artiklar att publiceras vid kommande konferenser världen över.

6 Slutsatser

De slutsatser man kan dra från detta samarbete med BC Hydro är att svenska beslutsfattare, forskare och ingenjörer har fått tillfälle att på ett mycket öppet sätt få ta del av alla resultat på troligen världens mest undersökta damm samt även fått möjlighet att bidra med egen erfarenhet.

Totalt har 12 rapporter tagits fram från svensk sida vilka har en nära anknytning till problematiken kring Bennett-dammen.

Detta har givetvis varit ett stimulerande arbete för alla direkt inblandade i samarbetet som höjt kunskapen och engagemanget för dammsäkerhetsfrågor både direkt för de inblandade, men även förhoppningsvis på sikt för svensk kraftindustri rörande frågor kring dammsäkerhet.

7 Referenser

- [1] Elforsks rapport nr 97:31 B, "Sammanställning av undersökningar vid W.A.C. Bennett dam, Canada", Elforsk, Stockholm December 1997
- [2] Elforsks rapport nr 99:9, "Messauredammen – dokumentation samt uppföljning av sjunkhål 1963", Elforsk, Stockholm Mars 1999
- [3] Elforsks rapport nr 99:27, "Echo sounding tecnology for inspection of earth- and rockfill embankment dams", Elforsk, Stockholm September 1999
- [4] Elforsks rapport nr 99:33, "Svenska fyllningsdammars känslighet för inre erosion", Elforsk, Stockholm September 1999
- [5] Elforsks rapport nr 99:34, "Inre erosion i svenska dammar – Beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar", Elforsk, Stockholm December 1999
- [6] Elforsks rapport nr 99:36, "Fibre optic system for temperature Measurements at the Lövön Dam", Elforsk, Stockholm December 1999
- [7] Elforsks rapport nr 99:37, "Reserapport, Bennett Dam, BC Hydro, Canada – Teknikbevakning av injekteringsarbeten", Elforsk, Stockholm December 1999
- [8] Elforsks rapport nr 99:49, "Comparative Evaluation of CFX and PHOENICS Codes in Modelling Flow in Porous Media", Elforsk, Stockholm December 1999
- [9] Elforsks rapport nr 99:47, "On the Non-Linear Pressure Distribution in Embankment Dams – A first Step Towards a Numerical Simulation Model", Elforsk, Stockholm December 1999
- [10] Elforsks rapport nr 00:10, "Brottförlopp vid genomströmning av en fyllningsdamm", Elforsk, Stockholm Februari 2000
- [11] Examensarbete av Ericsson J, Jender M, "Dokumentation och undersökning av skador i Lövödammen", Institutionen för Väg- och Vattenbyggnad, Luleå tekniska universitet, Luleå December 1999

Bilagor

A BC Hydro VASO Workshop – Agenda

BC HYDRO – VASO

May 17 - 21, 1999

Agenda

DAY 1	<u>Embankment Dams</u>		<u>May 17, 1999</u>
	Introduction	Al Imrie/G. Sjodin	8:00-8:15
1-1	Dam Safety Considerations (BC Hydro)	R.A. Stewart	8:15-9:00
1-2	Swedish Dam Safety Guidelines (VASO)	U. Norstedt	9:00-9:30
	<i>Break</i>		9:30 - 9:45
	Arching, Stress Analyses, Hydraulic Fracturing		
1-3	Stenkullafors (VASO)	A. Nilsson	9:45-10:30
1-4	Bennett and Mica (BC Hydro)	S. Garner /K. Lum	10:30 - 11:15
	Filter Criteria and Performance		
1-5	Inventory of filters in Swedish dams (VASO)	A. Nilsson	11:15 - 11:45
1-6	Mica Dam - Filter Evaluation (BC Hydro)	K. Lum	11:45 -12:15
	<i>Lunch</i>		12.15 - 1:15
1-7	Coursier Dam - Filter Design and Performance (BC Hydro)	S. Garner	1:15-1:45
1-8	Internal Erosion Case Histories (Grundsjoarna, Lovon) (VASO)	G. Sjodin	1:45-2:30
	<i>Break</i>		2:20 - 2:45
1-9	Internal Erosion Case Histories (Bennett, Coursier, Terzaghi, Ruskin) (BC Hydro)	S. Garner P. Gaffran	2:45-3:30
1-10	Cavity Development (BC Hydro)	S. Garner	3:30-4:00
DAY 2	<u>Embankment Dams (continued)</u>		<u>May 18, 1999</u>
	Seepage, Seepage Modelling and Drainage		
1-11	Seepage and seepage modelling (PLA)GS) A. Nilsson (VASO)	N. Johansson	8:00-8:45
1-12	Seepage flow in downstream shell (VASO)	N. Johansson	8:45-9:15
1-13	Drainage capacity - Bennett and Coursier (BC Hydro)	S. Garner	9:15-9:45
1-14	Seepage flow modelling - Mica (BC Hydro)	M. Lee	9:45-10:05
	<i>Break</i>		10:05 - 10:20
	Pore Pressure Behaviour and Air Theory		
1-15	VASO Experience	M. Billstein	10:20 - 11:20
1-16	BC Hydro Experience - Bennett	S. Garner	11:20 - 12:30
	<i>Lunch</i>		12.20 - 1.30
	Remediation for Piping / Internal Erosion		
1-17	Case Studies - Bennett, Coursier, Terzaghi (BC Hydro)	S. Garner / P. Gaffran	1:30-3:00
	<i>Break</i>		3:00 - 3.15
1-18	Case Studies - Lovon, Porjus (VASO)	G. Sjodin S. Johansson	3:15-3:45

May 17 - 21, 1999

DAY 3	<u>Field Excursion (Cheakamus Dam)</u> - travel by A. Imrie		<u>May 19, 1999</u>
	van along Howe Sound to dam (Whistler ski area for lunch)		8:00-16:30
DAY 4	<u>Surveillance</u>		<u>May 20, 1999</u>
	Surveillance and Monitoring		
2-1	Overview of Swedish recent and ongoing projects (VASO)	S. Johansson	8:00-8:30
2-2	Surveillance for Coursier and Bennett instrumentation and ADAS (BC Hydro)	S. Garner / D. Scott	8:30-10:00
	<i>Break</i>		10:00 – 10:15
2-3	Alarm protocols and response plans (BC Hydro)	D. Scott	10:15 -10:45
2-4	Long term monitoring plans, Bennett Dam (BC Hydro)	D. Scott	10:45 -11:15
	Geophysical Techniques		
2-5	Geophysical techniques, overview of BC Hydro experience, CEA Dam Safety Interest Group	K. Lum	11:15 -11:30
	<i>Lunch</i>		11:20- 12:45
	Floods		
3-1	Hydrological approach - BC Hydro (IDF, PMF)	W. Bell	1:00-1:45
3-2	Hydrological approach - Swedish Guidelines	C-O Brandesten	1:45-3:00
	<i>Break</i>		3:05- 3:20
	Geophysical Techniques (cont'd)		
2-6	Geophysical Techniques, VASO experience GPR, Cross-hole Radar, echosounding	S.Johansson	3:20-4:10
2-7	Long term monitoring and permanent installations (fibre optics, resistivity/SP, future installations) (VASO)	S.Johansson	4:10-4:30
2-8	Geophysical techniques - Bennett (BC Hydro)	P. Gaffran	4:30-5:20
DAY 5	<u>Risk Technology</u>		<u>May 21, 1999</u>
4-1	General remarks, FMEA/FMECA (BC Hydro)	D. Hartford	8:00-9:00
4-2	Risk-based approach - Keenleyside (detailed studies) (BC Hydro)	M. Lee / K. Lum	9:00-10:00
	<i>Break</i>		10:00 – 10:15
4-3	Life Safety and Risk-based decision making and risk management (BC Hydro)	D. Hartford	10:15 - 11:30
	General - Wrap - up	A. Imrie / U. Norstedt	11:30 - 12:00

B BC Hydro – VASO Workshop Minutes of Meeting

DATE: May 17 - 21, 1999

PLACE: BC Hydro, Edmonds Office
Podium A02, Large Conference Room (days 1,2,4 and 5)
Fieldtrip to Cheakamus Dam - Day 3

PRESENT:

VASO:

Stefan Berntsson	Sam Johansson
Mats Billstein	Ake Nilsson
Claes-Olof Brandesten	Urban Norstedt
Pär Hansson	Gunnar Sjodin
Nils Johansson	

BC HYDRO:

Kay Ahlfield	Michael Lee
Warren Bell	Ken Lum
Peter Gaffran	Dave Scott
Des Hartford	Ray Stewart
Al Imrie	

OTHERS:

Gary Salmon

DAY 1 - Monday, May 17,1999

(start at 8:00 a.m.)

1. INTRODUCTION:

A. Imrie welcomed everyone to the BC Hydro - VASO workshop. The purpose of the workshop is to exchange information on dam performance issues that are of mutual interest to both groups. The topics to be discussed at this workshop include embankment dams, surveillance, floods, and risk technology. He noted that recently VASO has reorganized and is now under the name of ELFORSK.

G. Sjodin noted that the first mutual cooperation workshop was held in Sweden in November, 1996 and was attended by R. Stewart and A. Imrie. He noted that there was much information to share as Sweden has some 30 case histories of sinkholes, and they were very interested in the developments of the WAC Bennett Dam investigations.

A. Imrie noted that workshop proceedings will be prepared with a copy of the presenters' materials. A short summary of the presentations is listed in the following sections.

2. DAM SAFETY CONSIDERATIONS:

1-1: BC HYDROS PROGRAM:

R. Stewart presented the considerations of the BC Hydro dam safety program. One key question for dam owners to address is "How safe is safe enough". To address this question, work is required in assessing the probability and risk. Risk communication as well as risk reduction will determine what is publicly tolerable. The public must recognize that a dam may be deemed "safe", but is never "risk free". More work is required by engineers to improve the understanding of "failure analyses" and "failure consequences", the quantification of uncertainties, and the communication of this information to the public. More work is also required on the management side.

Currently, BC Hydro has no criteria established, the regulator has no criteria established, and the public has had no participation. However, BC Hydro is committed to the development of risk assessment.

1-2: SWEDISH DAM SAFETY GUIDELINES:

U. Nordstedt presented an overview of the Swedish dam safety guidelines, which include the following:

- Consequence classification of dams:
 - 1A - Very high - high probability of loss-of-life;
 - 1B - High - low probability of loss-of-life;
 - 2 - Low; and
 - 3 - Very low.
- design loads, including spillway capacities;
- DTU (equivalent to OMS) manual;
- incident reports;
- surveillance - including monitoring requirements, weekly inspections, and formal inspections;
- dam safety re-evaluations (referred as SEED) - frequency 15 to 30 years;
- preparedness plans; and
- external reviews of each owner's dam safety program.

3. ARCHING, STRESS ANALYSES, AND HYDRAULIC FRACTURING:

1-3: Stenkullafors:

A. Nilsson presented a case history of the Stenkullafors Dam, constructed in 1982-83. Early in 1987, some 4 years after impoundment, sinkholes were observed at both the left and right dams adjacent to concrete structures. The presentation included:

- field investigations, including penetration testing, sampling, borehole radar (cross-hole tomography) and the installation of standpipes;
- laboratory testing, including triaxial testing, sieve analyses and Proctor compaction testing; and
- finite element and stability analyses.

Studies indicated that arching between the filters and the steel sheet piling had occurred. Possible failure mechanisms included:

- low stresses in the core resulting in hydraulic fracturing and seepage, triggering erosion adjacent to the cracks;
- core may be internally unstable, with fines migrating through the filter with soft wet layers in the core developing; or
- boundary between the core and the filter was not stable due to the coarse filter, initiating piping.

1-4: Bennett and Mica:

S. Garner presented the stress analyses work carried out by BC Hydro in 1989 using the computer program FEADAM, and by ITASCA in 1996 using the computer program FLAC. The 1989 results indicate that arching in the upstream core has occurred. The σ_3 stresses exceeded all measured pore pressures. The 1996 results indicate that low σ_3 stresses occurred at both abutments with a potential for hydraulic fracturing predicted at both sinkhole locations.

K. Lum presented the background of the Mica Dam and the conditions by which hydraulic fracturing may have occurred. Mica Dam, 244 m high and 813 m long, was completed in 1972. During construction in 1971, initial attempts to clear silt out of

vertical movement gauges and subsequent inflow tests in 1971 and 1973 in gauges MV8 and MV15 resulted in large amounts of water added without a significant rise in water levels. Stress analyses, using SIGMA/W, confirmed that hydraulic fracturing could have occurred. However, the hydraulic fracture which occurred was considered to be a local phenomenon and was not indicative of poor performance of the core.

4. FILTER CRITERIA AND PERFORMANCE:

1-5: Inventory of Filters in Swedish Dams:

A. Nilsson presented an inventory of filter designs in Swedish dams and associated problems such as sinkholes. The results are compared to the results by Fell and Foster's paper "Filter Testing for Dams - No Erosion and Continuing Erosion Boundaries".

1-6: Mica Dam - Filter Evaluation:

K. Lum discussed the core/filter compatibility for the Mica Dam. The core of Mica consists of glacial till, with a maximum particle size of 250 mm, about 25% to 40% fines (with 7% clay content). The filters consist of sand/gravel with a maximum particle size of 300 mm, with less than 5% fines. These filters appear to not meet modern filter criteria. The potential for internal erosion does not necessarily mean the filters will fail to perform satisfactorily. Other factors such as seepage gradients, large width of the filter and dam curvature must be considered. Mica Dam has functioned for more than 25 years with no indications of deteriorating performance.

1-7: Coursier Dam - Filter Design and Performance:

S. Garner presented the background of the Coursier Dam, constructed in 1962 and raised in 1968 to a height of 23 m. The dam consists of an upstream sloping clayey silt core founded on a complex glacial outwash deposit. There is no cutoff or upstream blanket. A sinkhole was discovered in early 1993. The reservoir was drawn down to low pool, and 3 old sinkholes were discovered nearby. The dam was repaired in 1995/96. The piping potential of the core and the filter were evaluated using Honjo and Veneziano. The results indicated that there was a high probability of piping occurring between the

lower core and the dam shells and the underlying foundation, as supported by field evidence.

1-8: Internal Erosion Case Histories - Grundsjoarna and Lovon:

G. Sjodin presented case histories where internal erosion had occurred at two dams sites - Grundsjoarna and Lovon.

At Grundsjoarna, a sinkhole 0.5 m in diameter and 1.6 m deep was discovered on the upstream crest in September 1990. The presentation includes findings when the dam was excavated down to the core and numerous voids and/or loose zones were discovered.

At Lovon, sinkholes were discovered in 1983 and 1986 at the upstream crest. Sinkhole investigations included drilling and sampling in 1986, rock grouting in 1992-93, Shelby tube sampling in 1997, and resistivity and temperature measuring from 1993-98.

1-9: Internal Erosion and Pipling - Case Histories at BC Hydro:

Case histories at Ruskin, Coursier, Bennett and Terzhagi were presented.

At Ruskin, seepage and piping is known to have occurred at the right abutment. The natural soils consist of sands, silts and tills. Piping has occurred since construction in the 1930's, with hundreds of cubic feet of sand emerged in drain holes. S. Garner presented results of seepage analyses and SP. Studies are ongoing.

S. Garner presented the history of seepage/piping problems at Coursier from 1969 to 1998. A number of repairs have been completed since 1970, including improving the instrumentation, placement of a glacial till blanket, construction of gravel berms on the downstream face and placing riprap on the upstream face. A major repair, with the installation of a geomembrane and upstream cutoff, was completed in 1996.

S. Garner presented the historical readings recorded at Weir 6 at Bennett Dam and compared its behaviour with current readings obtained after compaction grouting of the sinkholes had been completed. Results indicate that this weir has been a very good indicator of the sinkhole occurrence and that its behaviour has been changed as a result of the remediation of the sinkholes.

P. Gaffran presented the seepage and sinkhole case history of the Terzhagi Dam. Sinkholes have developed due to a poor contact of the sheetpile cutoff with the rock foundation at the original diversion dam. Remediation plans include drilling and grouting to improve the cutoff of the sheetpile and rock.

1 -10: Cavity Development:

S. Garner presented the analysis of the propagation of a pipe cavity in cohesionless, saturated core using the NorSand cavity contraction model (developed by Mike Jeffries of Golders Associates). Results indicate that a cavity can remain open as long as the surrounding soil remains undrained due to dilation. The cavity collapses when the surrounding soil resaturates. For Bennett core, the analysis indicated that a pipe could only remain open for hours or days (depending on the initial size) before collapsing.

(End of Day 1 at 4:30 p.m.)

DAY 2 - Tuesday, May 18,1999

(start at 8:00 a.m.)

5. SEEPAGE, SEEPAGE MODELLING AND DRAINAGE:

1-11: Seepage and Seepage Modelling - PLAXIS:

N. Johansson described the laboratory tests carried out to model flow through dams to determine the downstream slope stability. Stability of the downstream slope depended on particle size of the embankment, the inclination and the flow.

A. Nilsson described the computer modelling analyses using the program PLAXIS, carried out to model the results of the laboratory model tests. To check the downstream stability, both erosion and slope stability must be checked using Solvik and limit equilibrium.

1-12: Seepage / Flow in the Downstream Shell:

N. Johansson presented the work carried out to verify a mathematical model in 3-D to model the turbulent/laminar seepage flow in a dam with a damaged core and filter to determine the seepage point and flow rate on the downstream shell. Work included verifying the mathematical model to both analytic solutions and hydraulic models using a Hele-Shaw model. Results showed a good agreement between the numerical models with the analytical and experimental data. The models may become a useful tool to analyse extreme flow through conditions in dams.

1-13: Drainage Capacity - Coursier and Bennett:

S. Garner presented the drainage details of Coursier Dam. The dam is founded on a complex glacial outwash deposit. There is no drainage blanket, but a number of drainage pipes have been installed. After the sinkholes occurred in 1992, the pore pressures in the dam increased. At that time, it is estimated that the factor of safety was close to 1.0.

By comparison to Coursier, Bennett has good capacity drains, and analyses show that it would be difficult to elevate the pore pressures in the downstream shell. S. Garner presented the comparison between the drainage capacity and the maximum credible seepage, which varies from a ratio of 1.5 to 85 . Nevertheless, construction is currently underway to install a toe filter which would further improve the overall stability.

1-14: Seepage Flow Modelling - Mica:

M. Lee presented the seepage analyses carried out for the Mica Dam. 2-D analysis was used to model a 3-D geometry problem. M. Lee discussed the limitations. Simulation of the effects of a pervious "pipe" on seepage flow and phreatic surface was discussed. The results of the approximate analyses were used to study the feasibility of installing new instrumentation and the need to carry out further 3-D analysis.

6. PORE PRESSURE BEHAVIOUR AND AIR THEORY:

1-15: VASO Experience:

M. Billstein presented the work being carried out by VASO on air theory to explain the reasons for the differences in pore pressures in the core with theoretical models. During construction of the dam and the first reservoir filling, air bubbles can become trapped. Trapped air bubbles can deteriorate the hydraulic conductivity and cause a divergence from the saturated condition. This deterioration may be noticed as higher than expected pore pressures in the dam core. The VASO work includes developing a numerical model for this process, validated with laboratory experiments.

1-16: BC Hydro Experience - Bennett:

S. Garner presented the work being carried out on air theory as part of the Bennett Dam investigations. The objective is to develop an understanding of the mechanisms behind the falling pore pressures that are continuing within the core of the dam. A technical committee, consisting of Peter Byrne, John Sobkowicz, Serge Leroueil and Steve Garner, has been formed to review the hypotheses, develop theories, and verify with laboratory tests. Work is continuing.

7. REMEDICATION FOR PIPING / INTERNAL EROSION:**1-17: Case Studies - BC Hydro:**

S. Garner presented the remediation work completed at Coursier and Bennett.

The remediation of Coursier consisted of excavation of the upstream shell down to the core, the placement of a geomembrane liner, and reconstruction of the upstream shell. This work was carried out over two construction seasons due to harsh winter conditions encountered during the first construction season.

The Bennett sinkholes were remediated by compaction grouting. The work consisted of a trial program carried out at a test column site in Delta, BC to test the compaction grouting procedures to depths of up to 400 ft. The compaction grouting at the dam site was carried out in February and March, 1997. The grouting procedures were carefully controlled and monitored to minimize the potential for further fracturing of the core. A total of 2,900 ft³ of grout was added to Sinkhole 1.

1-18: Remediation - Lovon and Porjus:

G. Sjödin described the remediation of Lovon Dam. Remediation included partial excavation of the existing dam, installation of a sheet pile wall in a slurry trench, and reconstruction of the core, filters and dam shells.

S. Johansson described the remediation of Porjus Dam. A sinkhole occurred in July, 1993. A high seepage zone was identified about 2 to 4 m above the rock. The sinkhole was grouted using a sand/bentonite slurry mix close to the filter zone, with a cement/bentonite mix in the core. The effectiveness of the repair was measured by temperature measurements.

(End of Day 2 at 4:00 p.m.)

DAY 3 - Wednesday, May 19,1999

(leave Hotel at 0800, back approx. 1630)

(all distances are km from Horseshoe Bay)

8. BC HYDRO - VASO FIELD TRIP:**MAIN STOPS**

- Charles Creek (7.1) - debris torrent catchment dam
- Porteau Buffs (22.9) - rock slide stabilization along mountain highway
- Britannia Mines (32) - mining museum - brief stop for coffee
- Cheakamus Dam (78.8) - composite, earth and concrete dam built from 1954-56; designed by Karl Terzaghi; some unique design elements; dam safety aspects since original construction
- Whistler Village (ski resort) (101.4) - lunch stop
- Brandywine Falls (115) - cascade over young volcanics - short walk
- Cheakamus Canyon (130) highway upgrade project
- Tantalus Mountains - viewpoint (135) - optional stop

DAY 4 - Thursday, May 20,1999

(start at 8: 00 a. m.)

9. SURVEILLANCE AND MONITORING:**2-1: Surveillance and Monitoring - Overview of Swedish Projects:**

S. Johansson presented an overview of the various surveillance methods studied and used by VASO in the last few years. Methods include: ground penetration radar, borehole radar, temperature measurements, resistivity, SP and strain/temperature measurements using optical fibres.

2-2: Surveillance for Coursler and Bennett:

S. Garner described the monitoring program at Coursier Dam. Access to the site, in particular during the winter season, is very difficult and dangerous. Prior to 1992, 11 weirs and 9 standpipe piezometers were monitored manually. In 1992, the monitoring was improved by automating and winterizing 7 weirs, installing 28 vibrating wire piezometers with thermistors at 15 locations, installing 1 vibrating wire piezometer and 3 thermistors in the reservoir and upgrading the ADAS and communication links. A backup system was also installed.

D. Scott presented the improved monitoring program at the Bennett Dam. The following are monitored:

- piezometer pore pressures;
- seepage weirs/flumes/seeps, including video with tape delay and computer capture;
- sediment sampling and turbidity;
- thermal;
- surface surveys settlements and offsets;
- vertical movement gauges and inclinometers;
- in-place inclinometers, LVDTs, and scratch plates;
- underground surveys; and
- reservoir, tailwater and climate measurements.

About 690 instruments are monitored either manually or automatically. The data is downloaded onto a database program.

2-3: Alarm Protocols and Response Plans:

D. Scott presented the alarm protocols and response plans put in place for the Bennett Dam. Key monitoring instruments at the Bennett Dam are connected to the Automatic Data Acquisition System (ADAS) and scanned at preprogrammed intervals and tested for out-of-bounds alarms. The alarms are connected and logged with the GMS operator (on duty for 24 hours). The alarm levels are set for "blue alarm" for information and "red alarms" for action.

If immediate action is required, response plans are in place for the GMS operator to notify key personnel, such as the dam surveillance engineer, the ADAS technologist, and/or other appropriate area managers.

2-4: Long-term Monitoring Plans - Bennett Dam:

D. Scott presented the long-term monitoring plans put in place for the Bennett dam. BC Hydro has compiled a comprehensive instrument monitoring computer database and databook to aid the dam surveillance engineer in monitoring and evaluating the data.

A Performance Review Team (PRT) has been formed to periodically meet to review the data and evaluate the current performance of the dam.

10. GEOPHYSICAL TECHNIQUES:

2-5: Geophysical Techniques, Overview of BC Hydro Experience and CEA Dam Safety Interest Group:

K. Lum presented a summary of the geophysical techniques used at various BC Hydro dams, as follows:

- Keenleyside – temperature (1992)
- Coursier - SP (1993)

- Terzaghi – SP (1994)
- Bennett - various (1996)
- Mica - SP and temperature (1997)
- Ruskin-SP(1998)
- Coquitlam – SP (1998)

K. Lum also summarized the research needs identified at the CEA Dam Safety Interest Group Workshop on Internal Diagnostics for Embankment Dams, held at BC Hydro in February 1999. Identified research areas include:

- SP
- Electrical resistivity
- temperature and
- seismic.

Research projects estimated at \$1.1 million over 4 years.

2-6 and 2-7: Geophysical Techniques, VASO Experience and Long-Term Monitoring and Permanent Installations:

S. Johansson described the sites where temperature, resistivity and SP measurements are monitored on a regular basis. Fibre optic cables were installed at Lovon to continuously monitor the temperatures in the core, downstream filter and rock. Resistivity measurements are monitored at Lovon and Hallby Dams. As resistivity variations influenced by seepage are small, high accuracy of measurements is required.

2-8: Geophysical Techniques - Bennett:

P. Gaffran presented an overview of the geophysical techniques employed during the 1996 sinkhole investigations. The techniques used and the level of success is summarized:

- *worked well and useful.* downhole seismic; crosshole seismic; and magnetometer;
- *worked well but not useful.* nuclear logging; and bathymetry;
- *worked so-so, still useful.* SP; resistivity; and through-dam tomography; and

- *did not work and/or not useful.* EM34, EM61, GPR, and crosshole radar.

Geophysical techniques currently used for operational surveillance include temperature monitoring, crosshole seismic tomography (including downhole seismic velocity) and road radar. Other techniques that may be used for nonoperational surveillance include echo sounding, through-dam tomography, downhole nuclear logging, and SP.

11. FLOODS:

3-1: Hydrological Approach - BC Hydro:

W. Bell described BC Hydro's approach to evaluating the PMPs and PMFs.

For the PMF evaluation, the seasonability of the PMPs coupled with the reservoir storage capacity are considered - i.e. the worst condition may not occur in the winter when maximum PMPs occur if the reservoir has adequate capacity, but in the June/July period when the reservoir is full. Other considerations include the prestorm events, the average snowpack levels coupled with the PMP, or the maximum snow conditions coupled with the average rainfall.

To better evaluate the PMP/PMF, BC Hydro has initiated a number of studies to develop and calibrate atmospheric and watershed models. It may be a number of years before the atmospheric models can predict storms at specific sites using input from oceanic conditions and maximum storm conditions. However, work is continuing. BC Hydro uses two watershed models - the UBC Watershed Model developed by Dr. Quick at UBC and the WATFLOOD model developed at the University of Waterloo. These models are currently being tested to demonstrate their effectiveness in application in mountainous terrain.

NOTE: No presentation notes were available.

3-2: Hydrological Approach - Sweden:

C-O Brandesten presented the contents of the Swedish Guidelines for Design Flood Determination, established in 1990. Their basic approach is to use hydrological models to compute design floods generated through a combination of unfavourable meteorological and hydrological conditions, each of which has been estimated at a level previously observed. In Sweden, they have about 700 recording stations, equivalent to about 1 per 700 km². The method for determining the design flood is outlined in their guidelines, and case studies from the Lule and Ume Rivers were presented.

The dams are classified either as:

Class I - High hazard = significant risk of human life loss or injury and considerable risk or extensive damage on infrastructure; or

Class II - Low hazard = significant risk of damage on infrastructure.

(End of Day 4 at 5:30 p.m.)

DAY 5 - Friday, May 21, 1999

(start at 8:00 a.m.)

12. RISK TECHNOLOGY:**4-1: General Remarks, FMEA/FMECA - BC Hydro:**

D. Hartford presented an overview of the risk assessment work carried out at BC Hydro, since 1992. From 1992-95, risk analyses of 10 dams have been completed, with some successes and some failures. Success include:

- risk management was demonstrated for the Wahleach work and
- a scientifically defensible risk analysis process was developed for the Keenleyside Earthfill Dam.

The 1998 Corporate Policy Statement Guidelines does not force BC Hydro to quantify risks. D. Hartford described the "quantification dilemma" as quantified risk is sensitive to:

- understanding the failure modes, mechanisms, and consequences;
- the size of the event tree;
- the information available;
- the people involved and their skill in assigning probability values; and
- the method for assigning probabilities.

FMEA /FMECA forms a sound basis for qualitative and semi-quantitative analysis of risk, and can be used for prioritizing corrective or remedial actions.

4-2: Risk-based Approach - Keenleyside:

M. Lee presented the detailed risk assessment of the earthfill portion of the Keenleyside Dam. The calculation of the probability of failure, P_F was made by using an Event Tree. The analyses treats the seismic hazard, liquefaction potential, deformation of the dam, and damage states probabilistically. Both numerically-based and judgmental probabilities were used in the analysis. The methodology and the results were reviewed and endorsed by both (deterministic) geotechnical and risk specialists.

4-3: Life Safety, Risk-based Decision-making and Risk Management - BC Hydro:

D. Hartford presented the methodology developed by BC Hydro to compute the potential loss-of-life in the event of breach of the dam. This method is based on the reservoir level at the time of breach, determining the population at risk (PAR) at each community by assessing the size of the population, proximity to the river banks, escape potential, and warning times. The input required includes estimating the PAR's reaction to the incoming flood waters.

D. Hartford described the decision-making process carried out at BC Hydro to determine if a dam is "safe". This process is based on both traditional dam safety practice, including surveillance, formalized operation and maintenance procedures, and periodic dam safety reviews. In addition, a risk-based dam safety approach is also carried out, as appropriate.

D.Hartford described the prioritization scheme followed by BC Hydro in prioritizing its dam safety studies and remediation work. This process is based on:

- the consequences of dam failure;
- the extent to which a dam is considered not to conform to the requirements of the Canadian Dam Safety Guidelines; and the extent to which the actual or potential deficiency contributes to the world-wide statistics of dam failure and/or incidents.

13. WRAP-UP:

The wrap-up session was attended by Lorne Nelson (manager of PSE) and Dave Tobin (client services manager for international work). A. Imrie and U. Norstedt concluded the workshop by thanking all the presenters and agreeing that there were excellent benefits to both groups by sharing of information and experiences. It was agreed that continuing collaboration in the form of semiformal conference calls 2 -3 times a year should continue. In addition, a 2nd workshop would be considered in about a year's time.

(End of Day 5 at 12:00 p.m.)

14. POST-MEETING NOTE:

A copy of the presenters' materials is included in the following appendices:

- **Appendix A - Embankment Dams**

- **General**

- 1 -1: Dam Safety Considerations - BC Hydro (R. Stewart)

- 1-2: Swedish Dam Safety Guidelines (U. Norstedt)

- **Arching, Stress Analyses, and Hydraulic Fracturing**

- 1-3: Stenkullafors (A. Nilsson)

- 1-4: Bennett and Mica Dams (S. Garner and K. Lum)

- **Filter Criteria and Performance**

- 1-5: Inventory of Filters in Swedish Dams (A. Nilsson)

- 1-6: Mica Dam - Filter Evaluation (K Lum)

- 1-7: Coursier Dam - Filter Design and Performance (S. Garner)

- 1-8: Internal Erosion Case Histories - Grundsjoarna and Lovon (G. Sjodin)

- 1-9: Internal Erosion Case Histories - Ruskin, Coursier, Bennett and Terzaghi (S. Garner and P. Gaffran)

- 1-10: Cavity Development(S.Garner)

- **Seepage, Seepage Modelling and Drainage**

- 1 -11: Seepage and Seepage Modelling - PLAXIS (A. Nilsson and N.Johansson)

- 1-12: Seepage Flow in Downstream Shell (N. Johansson)

- 1-13: Drainage Capacity - Bennett and Coursier (S Garner)

- 1-14: Seepage Flow Modelling - Mica (IVI. Lee)

- **Pore Pressure Behaviour and Air Theory**

- 1-15: VASO Experience (IVI. Billstein)

- 1-16: BC Hydro Experience - Bennett (S. Garner)

- 1-17: Case Studies - Bennett, Coursier and Terzaghi (S. Garner and P. Gaffran)

- 1-18: Case Studies - Lovon and Porjus (G. Sjodin and S. Johansson)

- **Appendix B - Surveillance**

- **Surveillance and Monitoring**

2-1: Overview of Swedish Experience - Recent and Ongoing Projects (S. Johansson)

2-2: Surveillance for Coursier and Bennett (S. Garner and D. Scott)

2-3: Alarm Protocols and Response Plans (D. Scott)

2-4: Long-term Monitoring Plans - Bennett Dam (D. Scott)

- **Geophysical Techniques**

2-5: Geophysical Techniques, Overview of BC Hydro Experience and CEA Dam Safety Interest Group (K Lum)

2-6: Geophysical Techniques, VASO Experience - GPR, Crosshole Radar and Echosounding (S. Johansson)

2-7: Long-term Monitoring and Permanent Installations (S. Johansson)

2-8: Geophysical Techniques - Bennett (P. Gaffran)

- **Appendix C - Floods**

- **Floods**

3-1: Hydrological Approach (W.Bell)

3-2: Hydrological Approach (C-O Brandesten)

- **Appendix D - Risk Technology**

4-1: General Remarks, FMEA/FMECA (D.Hartford)

4-2 Risk-based Approach - Keenleyside (M. Lee)

4-3: Life Safety, Risk-based Decision-making and Risk Management (D. Hartford)



Reported by: Kay Ahifield

Attachment: Meeting Agenda



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35

www.elforsk.se