

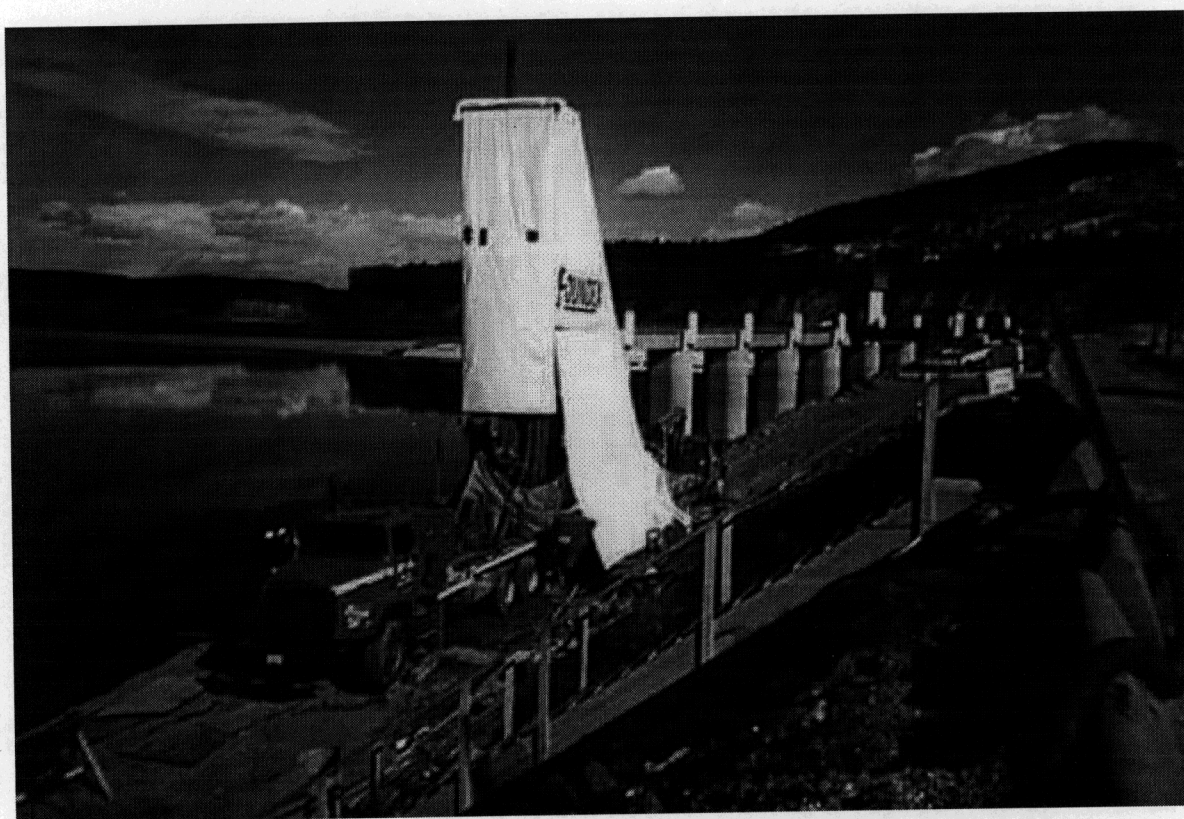
Sammanställning av undersökningar vid W.A.C. Bennett dam, Canada

Elforsk Rapport 97:31B

Sam Johansson

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

Elforsk rapport 97:31B



**Sam Johansson
HydroResearch Sam Johansson AB**

December 1997

SAMMANFATTNING

På krönet av W.A.C. Bennett dam i Brittish Columbia Canada, upptäcktes ett sjunkhål i juni 1996. Dammen ägs av BCHydro och är bland de största i världen. Dammen är 180 m hög med ett bakomliggande magasin av ca 70 milj km³. Detta föranledde kvalificerade undersökningsinsatser. I samband med undersökningarna upptäcktes ytterligare ett sjunkhål i augusti 1996. I läget för sjunkhålerna är dammen omkring 100 m hög vilket ställde stora krav på undersökningsmetodik.

BCHydro visade redan i ett tidigt skede att man såg att allvarligt på det inträffade, vilket avspeglades i den kraftfulla insatsen för att bedöma och åtgärda skadan. På plats fanns inom kort en stab från BCHydro, som sedan utökades med ca 30 högkvalificerade konsulter och tekniker. Som mest fanns samt ytterligare lika många för borrhningar och olika undersökningar. Ett stort satsning gjordes också för att informera såväl allmänheten som massmedia.

Fyra olika borrhnings- och sonderingsmetoder användes: Becker drill, Barber drill, large auger drill och Cone Penetration Test. Den metod som användes mest var Sonic drill. 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 mellanhålsmätningarna med skjuvvågsseismik. I den tomografiska analysen beaktades information både från enhåls- och mellanhålsmätningarna. Mätresultatet överensstämde väl med de resultat som erhöles med CPT-sonderingen. Eftersom resultatet från skjuvvågs-mätningarna gav en så värdefull information gjordes ytterligare mätningar både under och efter reparationen. Resultaten visar på tillfredsställande förbättringar av tätkärnans egenskaper som resultat av reparationen.

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

De undersökningar som gjordes av dränagematerialet visade på ett tydligt förhöjt innehåll av silt och sand. Nedströmsfiltrets dränagekapacitet är av avgörande betydelse för dammens förmåga att motstå eventuell läckageökning genom tätkärnan. Man bestämde därför att göra ett infiltrationsförsök i dräneringslagret för att bland annat kunna bedöma verklig dränagekapacitet och dränagematerialets permeabilitet. Slutsatserna av infiltrationsförsöket var att dränagekapaciteten överstiger 1000 l/s för de olika mätområdena som testades.

De undersökningar som utförts på W.A.C. Bennett dam är förmodligen de mest omfattande som hittills gjorts på någon dam. Ambitionen har varit hög och både beprövade metoder och nya metoder har använts. Det man imponeras av är framför allt de resurser man kunde sätta in på 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.

SUMMARY

In June 1996, a sinkhole was detected on the crest of the W.A.C. Bennett Dam in British Columbia Canada. The dam is one of the largest in the world and owned by BC Hydro. It has a height of 180 m and a reservoir volume of 70 million km³. As a consequence of the sinkhole an extensive investigation program started. During the investigation a second sinkhole was discovered in August 1996. The dam height at the sinkholes is about 100 m, which resulted in high demands both on drillings and investigation methods.

BC Hydro showed immediately their responsibility and their concern about the sinkhole and its consequence. A qualified project team was created and at place within some days. National and international experts were consulted early and about 30 people were included in the team. A similar number of people were also working with examination, drilling and monitoring. A couple of people were also appointed to inform the public and media.

Different kinds of drilling and sounding methods was used such as Becker drill, Barber drill, large auger drill and Cone Penetration Test. The most used method was Sonic drill. More than hundred holes were drilled.

Several geophysical methods were also used such as cross-hole seismic, resistivity, self-potential. Both intrusive and non-intrusive methods were used. The best result was obtained by cross-hole seismic. The tomographic analysis include result both from down-hole and cross-hole seismic. Good agreement was found with the CPT-soundings. Cross-hole measurements were also used for evaluation of the remediation efficiency, which showed a satisfactory improvement of the damaged area.

A system for Automatic Data Acquisition was installed in 1989. According to the sinkhole investigations additional measuring points were connected to the system. It monitors today about 130 measuring points such as water leakage, pressure, turbidity and temperature. Each measuring point has its own alarm settings. The system is followed carefully 24 hours day by the operation staff, and by specialists daytime. Key monitoring devices are also equipped with TV-monitors.

The examination of the drainage material showed an increase of fines. Since the capacity of the drainage filter is of major importance for the stability of the dam it was decided to test its capacity by a large inflow test. About 1000 l/s were injected in four different areas. The conclusion was that the drainage capacity was sufficient.

The examinations performed at the W.A.C. Bennett dam are probably among the most comprehensive which have been performed. The high and unprejudiced ambition is impressive, both concerning consequence analysis as well as the use of new and traditional methods. Valuable experiences have thus been collected both concerning application and performance of different examination methods on the same location.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	i
SUMMARY	ii
1 ALLMÄNT	1
1.1 Sjunkhålen vid W.A.C. Bennett Dam 1996	1
1.2 Organisation	2
2 BORRNING OCH SONDERING	2
2.1 Becker drill	2
2.2 Sonic drill	3
2.3 Large diameter drill	3
2.4 Barber	4
2.5 Cone Penetration Test	4
3 GEOFYSISKA UNDERSÖKNINGAR	5
3.1 Akustiska mätningar	5
3.2 Elektriska mätningar	6
3.3 Elektromagnetiska mätningar	6
4 ÖVERVAKNING	6
4.1 ADAS	6
4.2 Rörelsemätningar	7
5 KONTROLL AV DRÄNAGEKAPACITET	8
6 SLUTSATSER	9
7 REFERENSER OCH LITTERATUR	10
8 BILAGOR	10

SAMMANSTÄLLNING AV UNDERSÖKNINGAR VID W.A.C. BENNETT DAM, CANADA.

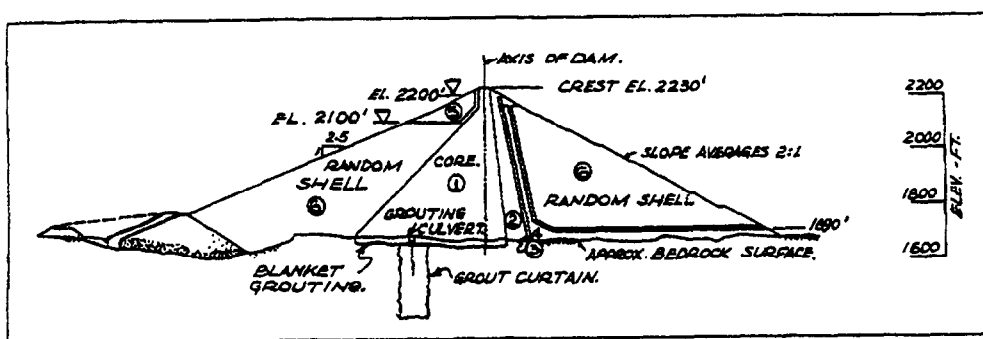
1 Allmänt

Detta projekt ingår i ett forskningssamarbete mellan BCHydro och VASO med anledning av de utförda arbetena vid W.A.C. Bennett dam. Ett sjunkhål upptäcktes där i juni 1996 vilket föranledde stora kvalificerade undersökningsinsatser. I samband med undersökningarna upptäcktes ytterligare ett sjunkhål i augusti 1996.

Information och underlag till denna presentation har erhållits genom sammanställning av rapporter, besök på platsen, samt genom direkta kontakter med personal från BCHydro. För detta projekt gjordes ett speciellt besök under april 1997, tillsammans med Gunnar Sjödin Vattenregleringsföretagen och Pär Hansson, Vattenfall Utveckling, som också skrivit en reserapport speciellt med avseende på injekteringsarbetena, Hansson (1997).

1.1 Sjunkhålen vid W.A.C. Bennett Dam 1996

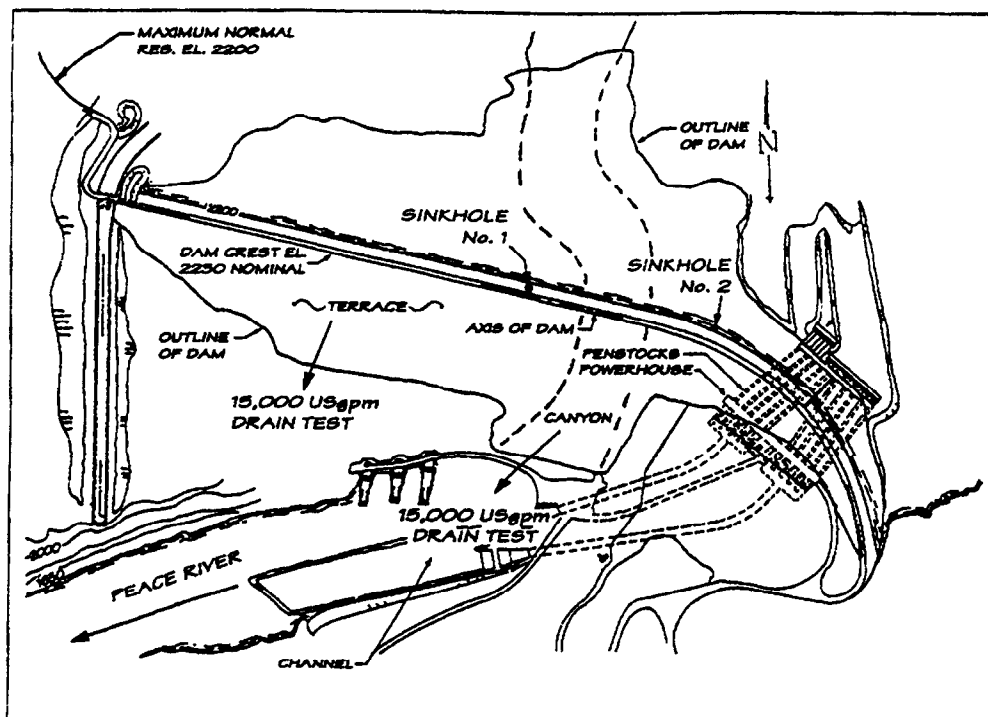
W.A.C. Bennett Dam är belägen vid Peace River i Brittish Columbia, ca 100 mil nordost om Vancouver. Dammen är 180 m hög och byggdes under åren 1964-67 och var då världen tionde högsta jorddamm. Dammen är en fyllningsdamm med en bred tätkärna av morän, omgiven av filter, se Figur 1.



Figur 1 Tvärsektion genom dammen (efter Ripley 1965)

Sjunkhålen uppkom intill två mätbubbar som användes under byggnadstiden. Dubbarna var placerade på vardera sidan av den ursprungliga älvfåran, se Figur 2 och höjdes successivt nä dammens byggdes.

I läget för sjunkhålen är dammen omkring 100 m hög vilket ställde stora krav på undersökningsmetodik, både beträffande bormetoder och geofysiska metoder. Flera nya metoder testades i denna miljö vilket gav värdefulla erfarenheter. Det kan noteras att dammsäkerhetsmyndigheten förbjöd all bormning i tätkärnan intill dess att magasinet sänkts av och att BCHydro därefter fick informera myndigheten inför varje bormning. Under den tid som bormningsförbudet gällde var man därför helt beroende av oförstörande provning.



Figur 2 Översikt av W.A.C. Bennett dam med kraftstation och övriga anläggningar.

1.2 Organisation

BCHydro visade redan i ett tidigt skede att man såg att allvarligt på det inträffade, vilket avspeglades i den kraftfulla insatsen för att bedöma och åtgärda skadan. På plats fanns inom kort en stab från BCHydro, som sedan utökades med egen personal, konsulter och tekniker. Som mest fanns ca 30 ingenjörer samt ytterligare lika många personer för borringar och olika undersökningar.

För att säkerställa arbetets tekniska kvalitet och inriktning fanns en "Technical Review Group" bestående av tre experter, en från BCHydro och två utomstående. Denna grupp hade möte med projektstaben minst en gång per månad.

Dessutom fanns ett "Advisory Board" som bestod av dammens konstruktör Dr. Ralph Peck och Prof. Nils Morgenstern. Vid gruppens möte fanns representanter för ansvariga vattenmyndigheter i berörda delstater, liksom från dammsäkerhetsansvariga på BCHydro.

Ett stort satsning gjordes också för att informera såväl allmänheten och massmedia. Under de första månaderna fanns minst en person tillgänglig för att svara på frågor. Regelbundna pressmeddelanden utarbetades och pressen inbjöds också till besök på platsen. Information lades också ut på Internet (adressen är <http://www/ewu.bchydro.bc.ca>).

2 Borring och sondering

I denna del av Nordamerika förekommer både olje- och gasfyndigheter. Därför finns god tillgång av både stora borrhjor samt erfaren personal. Fyra olika borrhjor- och sonderingsmetoder användes: Becker drill, Barber drill, large auger drill och CPT.

2.1 Becker drill

Becker drill har en dieseldriven hammare som driver ned ett öppet eller slutet foderrör. Med slutet foderrör var penetrationen endast ca 10 m i tärkärnans oförstörda delar, men med öppet foderrör ökade borrhjupet. Vid detta förfarande krävdes emellertid tryckluft för

att blåsa upp jordmaterialet. Vid sådan borrhning är risken stor för uppkomst av hydraulisk uppspräckning och metoden användes därför bara i början av undersökningen och i mindre känsliga områden. Totalt borrades tio hål innan metoden övergavs till förmån för Sonic drill.

2.2 *Sonic drill*

Denna metod har främst använts vid markundersökningar ned till ca 60 m djup. Metoden har ej tidigare använts vid dammundersökning och ej heller ned till aktuella djup. Det största djupet som uppnåddes var 139 m i fast till mycket fast material i tät kärnan. Under 1996 utfördes 26 borrhningar varav 16 i tät kärnan, fyra borrhningar i övergångslagret samt sex borrhningar i stödfyllningen nedströms.

Sonic drill har ett borrhuvud som skapar en vertikal vibrering, samtidigt som foderröret roterar och drivs nedåt. Diametern kan variera beroende på önskat undersökningsdjup. Vid borrhningen erhålls kontinuerliga prover. För provtagning på stora djup utvecklades en speciell provtagare där materialet frystes ned med hjälp av flytande koldioxid.



Figur 3 *Borrhning med Sonic drill vid sjunkhål 1.*

2.3 *Large diameter drill*

För att kunna få representativa materialprover i dräneringslagret gjordes två borrhningar, där foderrörets diameter var 0,6 m. Foderröret drevs ned samtidigt som material togs upp med en "bucket auger" med 0,4 diameter och 1,2 m lång. Metoden var tidskrävande och dyrbar.

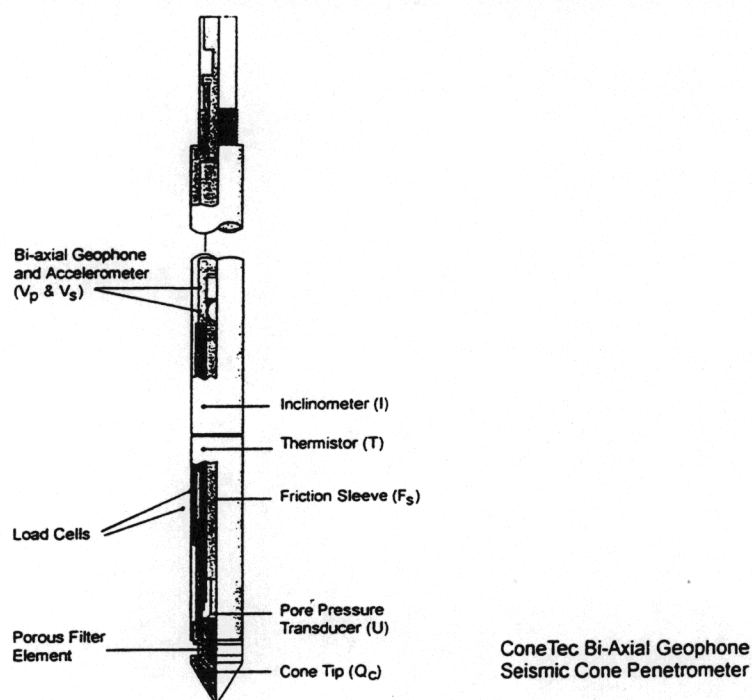
Proverna analyserades och resultatet jämfördes med de resultat som erhållits med borrhningarna med Barber och Sonic drill. Alla tre metoderna visade på samstämmiga resultat trots att Barber drill använder tryckluft för att få upp materialet.

2.4 Barber

Barber rigg är en tryckluftsdriven utrustning med två borrhuvud. I toppen av borrstangen finns ett roterande huvud, som tillsammans med en hammare i botten av röret driver det nedåt. De olika borrhuvudena kan manövreras oberoende av varandra. Tryckluft som passerar inuti borrstålet och driver upp materialet i utrymmet mellan borrstålet och foderröret. Metoden användes främst på dammens nedströmssida där känsligheten är mindre för de stora tryck som erfordras för att hålls för att få upp materialet. De flesta borrhuvuderna gjordes i samband med infiltrationsförsöket, vilket beskrivs nedan.

2.5 Cone Penetration Test

Cone Penetration Test (CPT) var den metod som användes mest i vid undersökning i sjunkhålens närhet. Åtta sonderingar gjordes vid sjunkhål 1 och fem vid sjunkhål 2. Konen (se figur 4) pressas ned med en borrhigg samtidigt som mätningar görs av: tryckmotståndet på spetsen, mantelfriktion, dynamiskt portryck och temperatur. Dessa mätningar görs kontinuerligt. I detta fall kunde man lägga på en belastning av upp till 20 ton vid nedpressning av sonden, vilket gav ett största undersökningsdjup av 115 m.



Figur 4 CPT-konens utseende och mätkroppar.

De förlängningsstänger som används är en meter långa. Vid varje skarvning gjordes enhålsseismik. Som ljudkälla användes modifierade gevär, vilka avfyrades 0,3 m under mark. I vissa fall användes flera ljudkällor placerade i olika riktningar och på olika avstånd från sonderingshålet. Resultatet från varje mätning analyserades direkt m a p skjuvvågshastighet. Mätningen upprepades tills önskad mätkvalitet uppnåts.

Resultatet från varje borrhuvud visas i diagramform för de olika parametrarna. Från dessa data CPT-sonderingar kan materielat sedan klassificeras enligt empiriska utvärderingsdiagram. Exempel på mätdata och utvärdering finns redovisas i Bilaga 1.

3 Geofysiska undersökningar

I sammanställningen nedan beskrivs resultat och erfarenheter från de oförstörande metoder som användes. För vidare beskrivning av metoderna hänvisad till Johansson et al (1995).

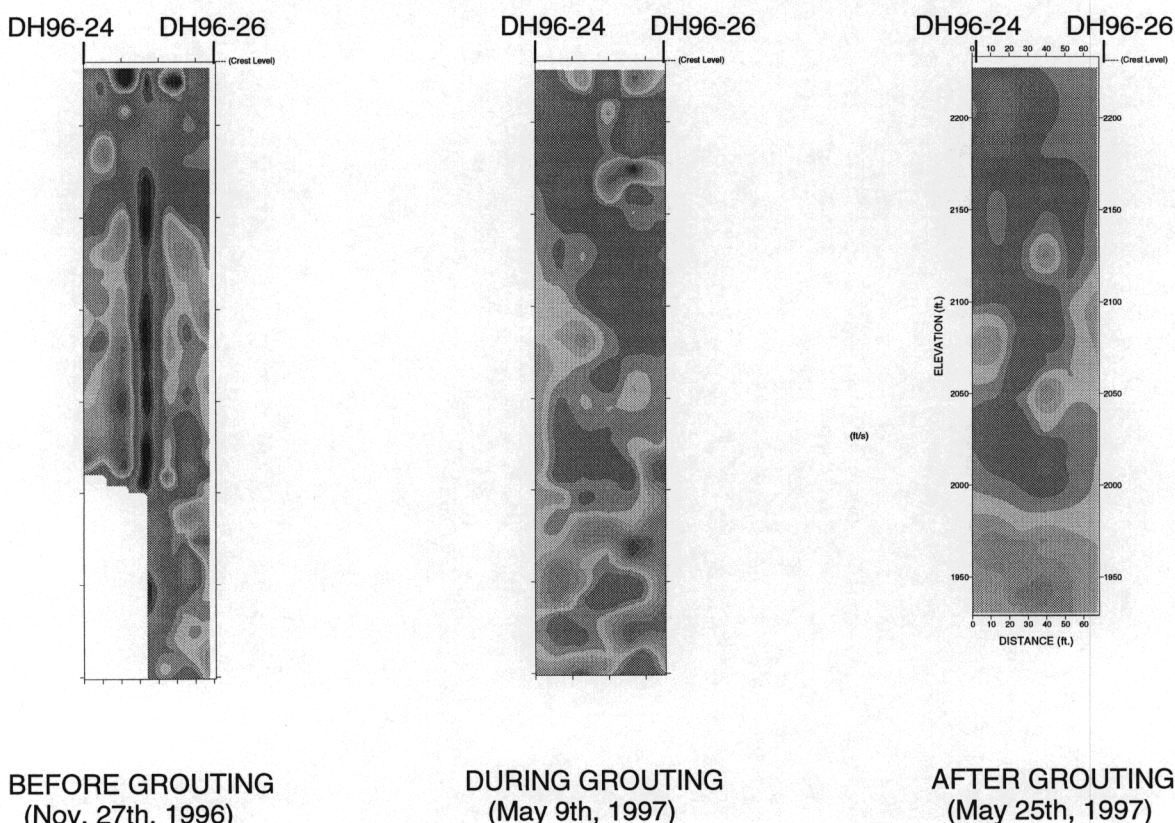
3.1 Akustiska mätningar

Akustiska mätningar i dammen utfördes endast från eller till borrhål. Flera olika varianter användes:

- en-hålsmätningar vid CPT-sonderingen,
- en-hålsmätningar från observationsrör och nya borrhål, samt
- mellanhålsmätningar.

Mätningar gjordes både med kompressions- och skjuvvågorna. Det bästa resultatet erhöles vid mellanhålsmätningarna med skjuvvågen, speciellt sedan man vid den tomografiska analysen lagt ihop information både från enhåls- och mellanhålsmätningarna. Skjuvvågen beror främst av materialets densitet och spänningsförhållanden i dammen. Eftersom sjunkhålen var cylinderformade blev kontrasten stor mellan skadad och oskadad tåtkärna. Mätresultatet överensstämde väl med de resultat som erhöles med CPT-sonderingen.

Eftersom resultatet från skjuvvågsmätningarna gav en så värdefull information gjordes ytterligare mätningar både under och efter reparationen. Resultaten visar på tillfredsställande förbättringar av tåtkärnans egenskaper som resultat av reparationen.



Figur 5 Mätresultat från borrhålsseismik mellan borrhål DH96-24 och DH96-26 före, under och efter reparation av sjunkhål 1. Ju varmare färg desto högre ljudhastighet, dvs desto fastare material. (Preliminära mätresultat erhållna från BCHydro.)

3.2 *Elektriska mätningar*

Både resistivitet och självpotential (SP) mättes i flera profiler på dammen under sommaren 1996. Generellt var mätförhållandena svåra och dessutom erhöles störningar från olika installationer på dammen. Metoderna användes därför ej för ytterligare mätningar.

Resistivitetsmätningar utfördes från dammkrönet samt från tre av terrasserna. Materialet i dammkroppen var grovt och torrt, vilket ger högt elektriskt motstånd. Den utsända strömstyrkan blev därför liten i förhållande till mätdjupet och mätnoggrannheten blev låg. Resistivitetsmätningarna från krönet visade lågresistiva zoner i dammen vid sjunkhål 1 samt vid anslutningen mot vänster sida. Mätresultatet från resistivitetsmätningarna är dessvärre var tvetydigt och noggrannheten på djupet minskar.

Även SP-mätningarna både de som utfördes på dammen och från reservoaren visade anomalier vid sjunkhål 1 samt i de djupaste partierna i den gamla flodfåran. Resultatet var svårtolkat och slutsatsen blev att anomalierna ej nödvändigtvis behövde ha något samband med eventuellt förhöjt läckage.

Kompletterande SP-mätningar gjordes även på dammens nedströmssida under dränagetesten. Inget entydigt samband kunde erhållas mellan självpotentialen och infiltrationsflödet.

3.3 *Elektromagnetiska mätningar*

Georadarmätningar från ytan utfördes i ett tidigt skede. Även dessa mätningar har i detta fall för liten djupnedträngning och mätningar gjordes enbart under sommaren 1996. Detsamma gäller även för de övriga elektromagnetiska metoderna, EM 34 och EM 61 samt magnetometer. Slutsatsen var att dessa metoder var mindre lämpliga för aktuell tillämpning.

Georadarmätningar planeras dock att utföras för regelbunden efterkontroll av tät kärnans krön för att närmare söka upptäcka pågående förändringar i dammens översta delar och för att upptäcka eventuella hålrum under asfaltsbeläggningen.

Borrhålsradar-mätningar utfördes vid sjunkhål 1. Mätresultaten var till en början svårtolkade, men genom förbättrad tolkningsmetodik blev tolkningarna bättre. Eftersom skadans utbredning var cylinderformad är den svår att upptäcka med tomografiska mätningar med borrhålen parallella med cylindern. Georadar detekterar primärt förändringar i vattenhalten och eftersom förändringen var liten i skadeområdet erhöles endast en svag kontrast mellan skadad och oskadad kärna. Tack vare en avancerad utvärdering blev dock resultatet användbart och kunde bekräfta de resultat som erhöles med andra metoder.

4 Övervakning

4.1 *ADAS*

Ett system för automatisk datainsamling av läckage- och tryckmätningar började installeras under 1989. I samband med sjunkhålet ökade antalet mätpunkter och för närvarande är ca 130 mätinstrument anslutna till systemet. I mätsystemet finns larmgränser inlagda. Mätningarna övervakas kontinuerligt av driftspersonalen, som också har möjlighet att följa mätöverfallen via TV-monitorer. De parametrar som mäts för närvarande är läckage, tryck, temperatur och turbiditet (grumlighet). Dessutom sker kompletterande tryckmätningar och temperaturmätningar manuellt, vilka läggs in i mät databasen.

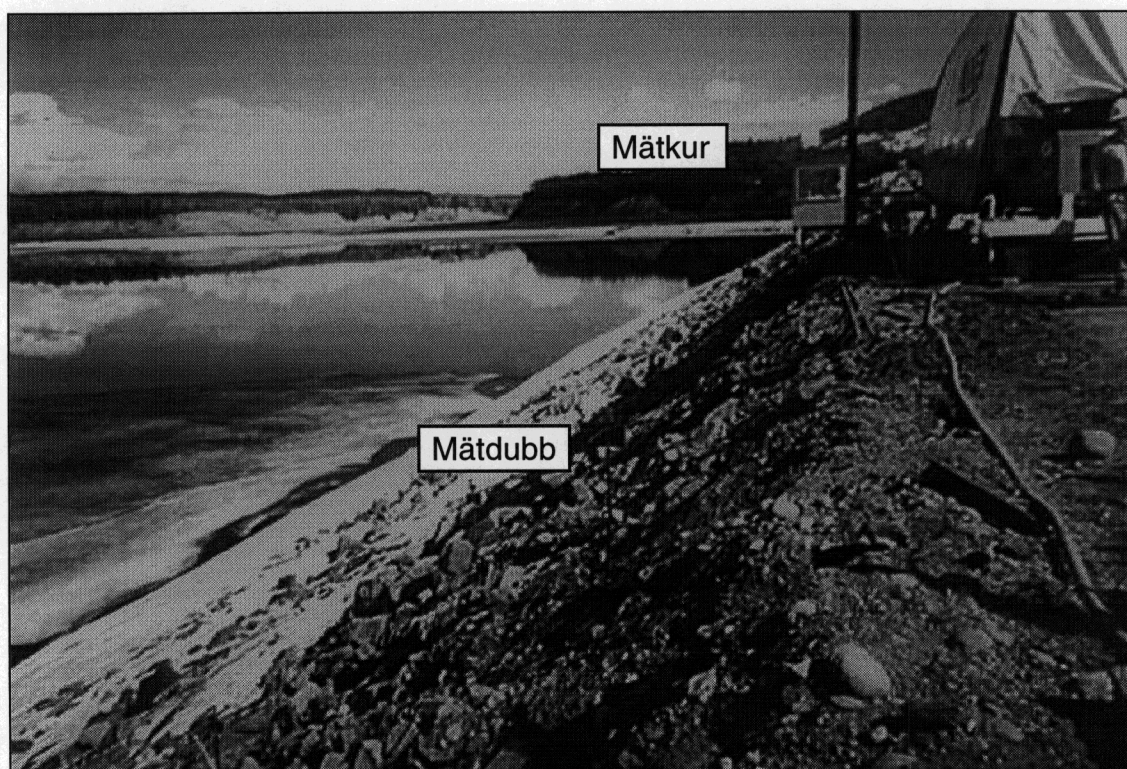
Hela mätsystemet är väl genomtänkt för att erhålla hög driftsäkerhet, även under de svåra klimatiska förhållandena som råder med extrem kyla. Hela anläggningen är uppbyggd kring enhetliga moduler. Varje mätinstrument är individuellt skyddat mot åska, men vitala reservinstrument/komponenter fanns för säkerhets skull också tillgängliga på dammen.

Mätinstrumenten avläses av lokala mätinsamlingsenheter som regelbundet levererar mätdata via radiolänk till den centrala mät datorn. I mät datorn bearbetas och lagras data. Om mätdata faller utanför fastställda larmnivåer, ges larm till kraftverkets driftcentral, vilka är bemannad dygnet runt. För utvärdering av resultatet finns personal tillgänglig dagtid, som ansvarar både för mätning och utvärdering.

Manuella mätningar görs av temperatur i observationsbrunnarna och några borrhål en gång per månad, samt av de tryckgivare som ännu ej anslutits till ADAS. Speciellt kan nämnas de borrhål där tryckmätningar kan utföras på olika nivåer. Denna teknik kan vara intressant även för svenska förhållanden, varför en kort information har bilagts, jfr Bilaga 3.

4.2 Rörelsemätningar

Mät dubbar både på slänten och dammkrönet inmättes dagligen efter det att skadan upptäckts. Mätintensiteten trappades därefter successivt ned. I läget kring sjunkhålen ökade mätintensiteten igen när reparationen påbörjades. För att underlätta mätningarna byggdes speciella mätkurar, se Figur 6.



Figur 6 *Regelbunden avvägning gjordes av uppströmsslänten och dammkrönet. Stort arbete hade gjorts för att göra mätningarna mindre känsliga för det kalla klimatet. Många instrument var även inbyggda i kurar, liknande den som visas på bilden.*

5 Kontroll av dränagekapacitet

De undersökningar som gjordes av dränagematerialet visade på ett tydligt förhöjt innehåll av silt och sand. Följande förklaringar på förekomsten av finmaterial har föreslagits:

- nedmalning vid borring och provtagningen,
- nedkrossning vid kompakteringen under byggnadstiden
- ”förorening” under byggnadsskedet genom exempelvis vind, byggfel
- nedåtgående transport av finmaterial från ovanför liggande material
- transport från tätkärnan, övergångslager eller filtret, eller
- kombination av en eller flera orsaker.

Nedströmsfiltrets dränagekapacitet är av avgörande betydelse för dammens förmåga att motstå eventuell läckageökning genom tätkärnan. Med infiltrationsförsöket ville man få underlag för att kunna:

- bedöma verklig dränagekapacitet,
- bedöma dränagematerialets permeabilitet, samt
- bedöma hur mycket av flödet som strömmar genom berget förbi flödesmätningen i dränagesystemet.

Ett första infiltrationsförsök gjordes i december 1996 då 35 l/s infiltrerades i sex brunnar samt i de två stora borrhålen med 0,6 m diameter. Mätningar gjordes av vattenstånd och flöde och resultatet användes för att utvärdera permeabilitet, storativitet och porositet. Infiltrationen utfördes i fyra delområden, så att flödet kunde styras till bestämda mätöverfall. De olika delområdena avgränsas av den naturliga bergtopografin samt av speciella dammar ”splitter dikes” som styr läckageflödet till önskat mätöverfall. Dessa flöden som avsågs testas var mer än tio gånger högre än de normala vilket innebar att mätöverfallen fick modifieras.

Den andra testen utfördes under sommaren 1997 i fyra etapper längs hela dammen. Sammanlagt gjordes 21 st brunnar fördelade över de olika mätområdena. Det största flöde som infiltrerades var ca 1000 l/s. Detta flöde är cirka 60 ggr större än det normala flödet i respektive mätsektioner. För mätningar borrades tolv hål vilka försågs med tryck- och temperaturgivare. Dessutom gjordes sju extra dränagebrunnar vid dammfoten för att vid behov kunna pumpa in eventuellt förbiströmmande vatten till mätöverfallet.

För att tillgodose vattenmängderna byggdes en vattenledning från vattenmagasinet uppströms. Ledningen har HDPE-ledning med ytterdiametern 600 mm. Ledningen lades permanent för eventuell framtida upprepning av försöket. På en flotte monterades fyra 300 mm centrifugalpumpar, vardera tillsammans med en 400 hp dieselmotor. Kapaciteten för varje enhet var ca 330 l/s, vilket innebar att den önskade kapaciteten kunde erhållas med tre pumpar i drift.

Vid varje infiltrationsbrunn gjordes avstick där flexibla ledningar med mindre diameter kunde kopplas in. På dessa monterades ventiler så att önskat flöde kunde erhållas, samt avluftsventiler, jfr Figur 7.



Figur 7 Ledning för infiltrationsförsöket på terassen, där fyra brunnar var inkopplade, jfr de fyra byglarna av flexibla ledningar.

Mätningarna var omfattande vid försöken (flöde, tryck temperatur, turbiditet) och all data insamlades till största delen via ADAS. Testningen av respektive mätsektion tog ca en vecka och flödet ökades stegvis. Mätresultaten är instruktiva och visar tydligt på de dynamiska förloppen, exempelvis för tryck och flöde, eftersläpningen mellan infiltrerat flöde och uppmätt i mätöverfallen, jfr de exempel på mätresultat som redovisas i Bilaga 2.

Resultatet användes sedan som indata för numeriska beräkningar. Den hydrauliska konduktiviteten för dränagematerialet i de olika mätområdena utvärderades till $K=0,10 - 0,25$ m/s, vilket överstiger de resultatet från de labförsök som gjorts på det ursprungliga materialet, $K=0,02 - 0,08$ m/s. Utvärdering av porositeten gav ett värde mellan 0,25 och 0,35 vilket överensstämmer med laboratorieresultaten.

Slutsatserna av infiltrationsförsöket var att dränagekapaciteten överstiger 1000 l/s för de olika mätområdena. Mellan 85 och 90% av det infiltrerade vattenvolymen kunde återfinnas i mätöverfallen, vilket tyder på att dränagesystemets infångningsförmåga är god, samt att perkolationen till berget är liten.

6 Slutsatser

De undersökningar som utförts på W.A.C. Bennett dam är förmodligen de mest omfattande som hittills gjorts på någon dam. Ambitionen har varit hög och både beprövade metoder och nya metoder har använts. Det man imponeras av är framför allt de resurser man kunde sätta in på kort varsel, den höga ambitionsnivån, samt den förutsättningslösa attityden.

Undersökningarna har still stor del varit av forskningskaraktär i full skala. Detta har givit värdefulla erfarenheter både beträffande olika metoder användningsområden samt inte minst möjligheter att jämföra metoderna med varandra på samma undersökningsobjekt.

7 Referenser och Litteratur

Hansson, Pär: *Reserapport Bennett Dam, BCHydro, Canada- Teknikbevakning av injekteringsarbeten*, Vattenfall Utveckling, UC 97:9, 1997.

Johansson, S., M. Bartsch, O. Landin, G. Barmen, T. Dahlin och P. Ulriksen: Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar, *VASO Dammkomite rapport 21*, Stockholm, ISSN 1400-7827, 1995.

Ripley, C. F. (1965). Portage Mountain Dam, I. An outline of the project. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. IV, No 2, pp 125-141.

Stewart, R.A., B.D. Watts, J.C. Sobkowicz, A.Kupper. Bennett Dam Sinkhole Investigation, *Geotechnical News*, Vol 15 No 1, 1997.

8 Bilagor

Bilaga 1. Exempel på redovisning från CPT-sondering.

Bilaga 2.. Exempel på mätresultat från dränagetesten.

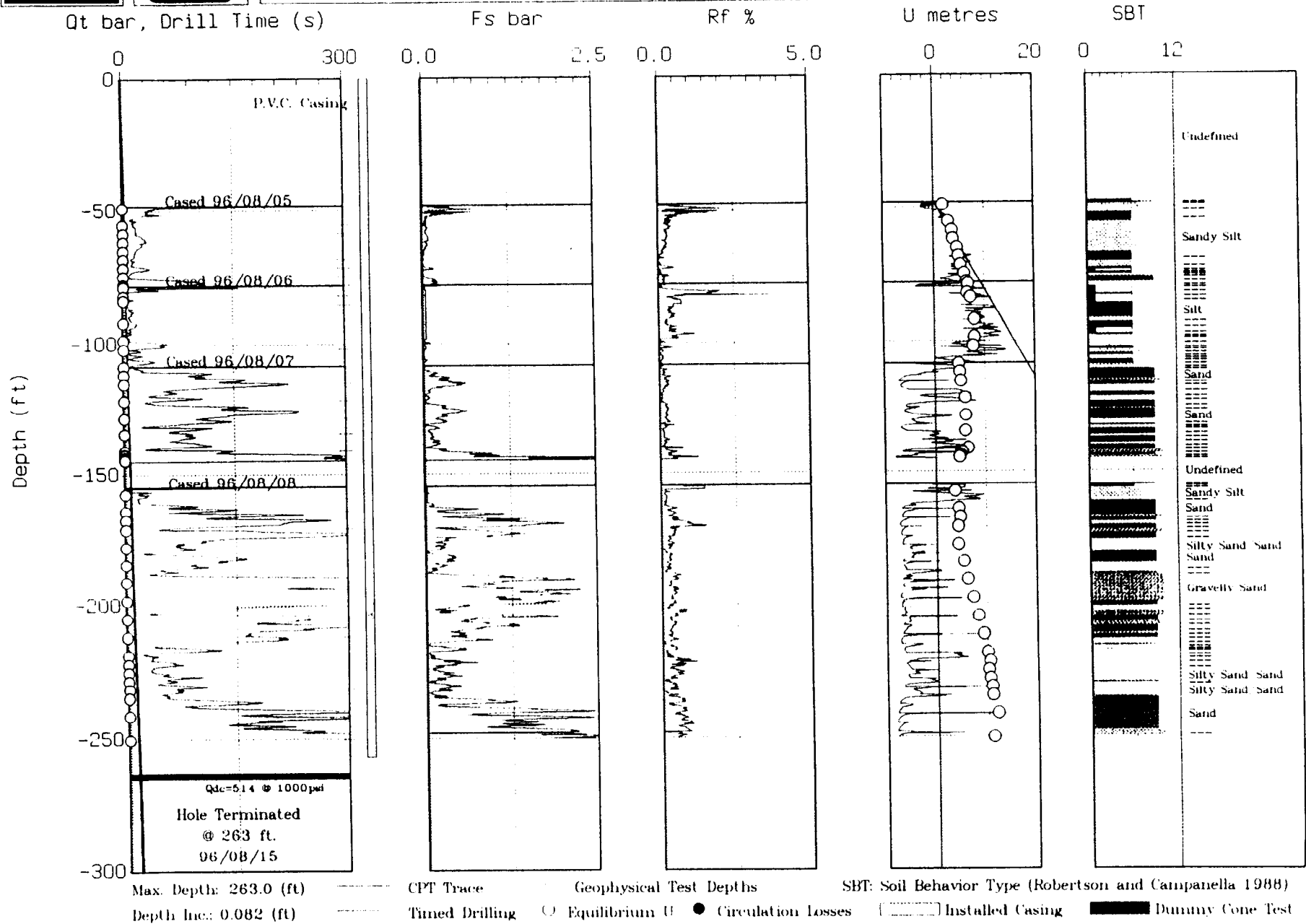
Bilaga 3. Produktblad, utrustning för multipla tryckmätningar

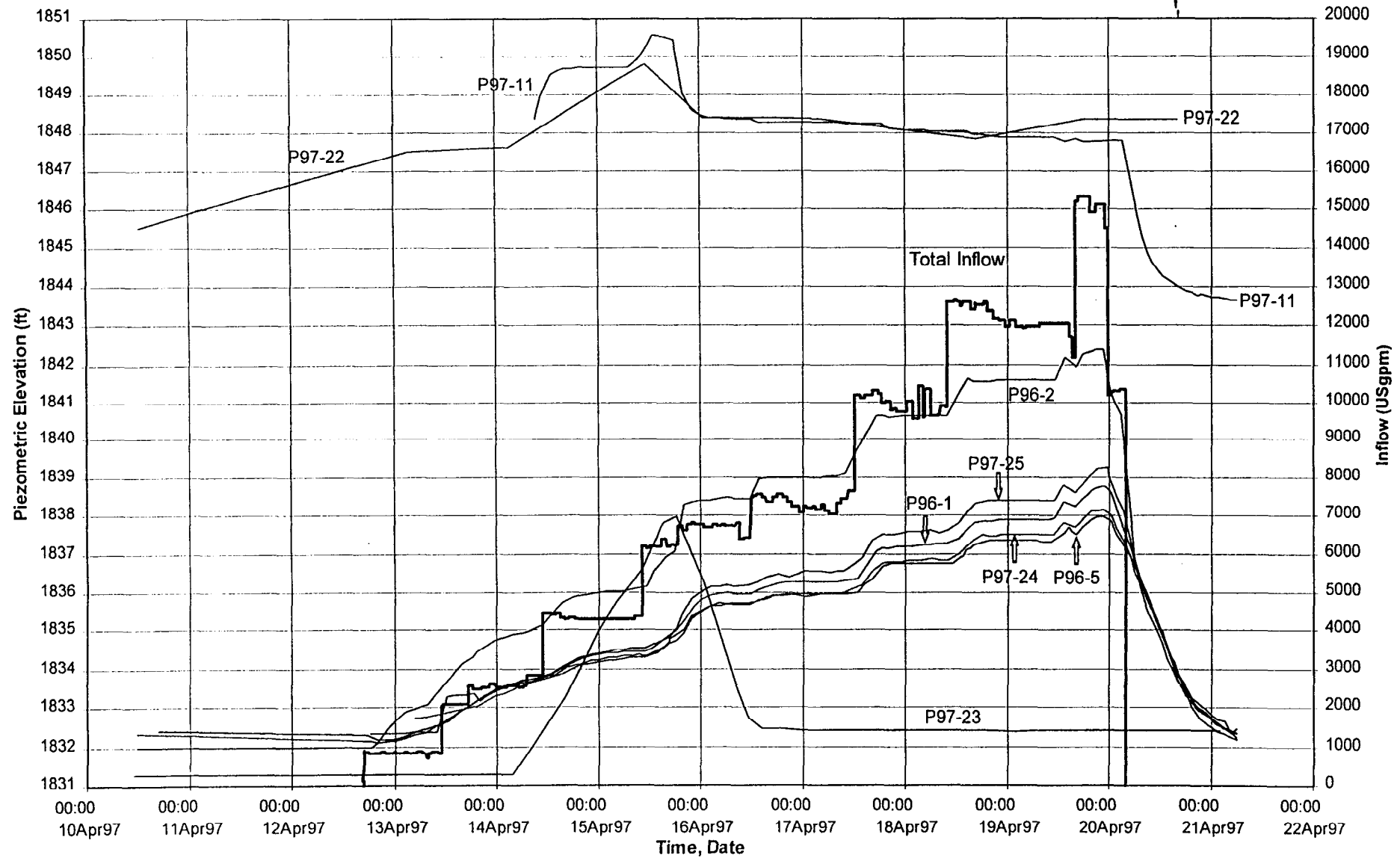


Bennett Dam

Site: CPT96-1
Location: BENNETT DAM

Cone 20 TUN 4 024
Date: 08/05/96 1959





BChydro WAC Bennett Dam

DATE: SEPT 1997

SINKHOLE INVESTIGATION

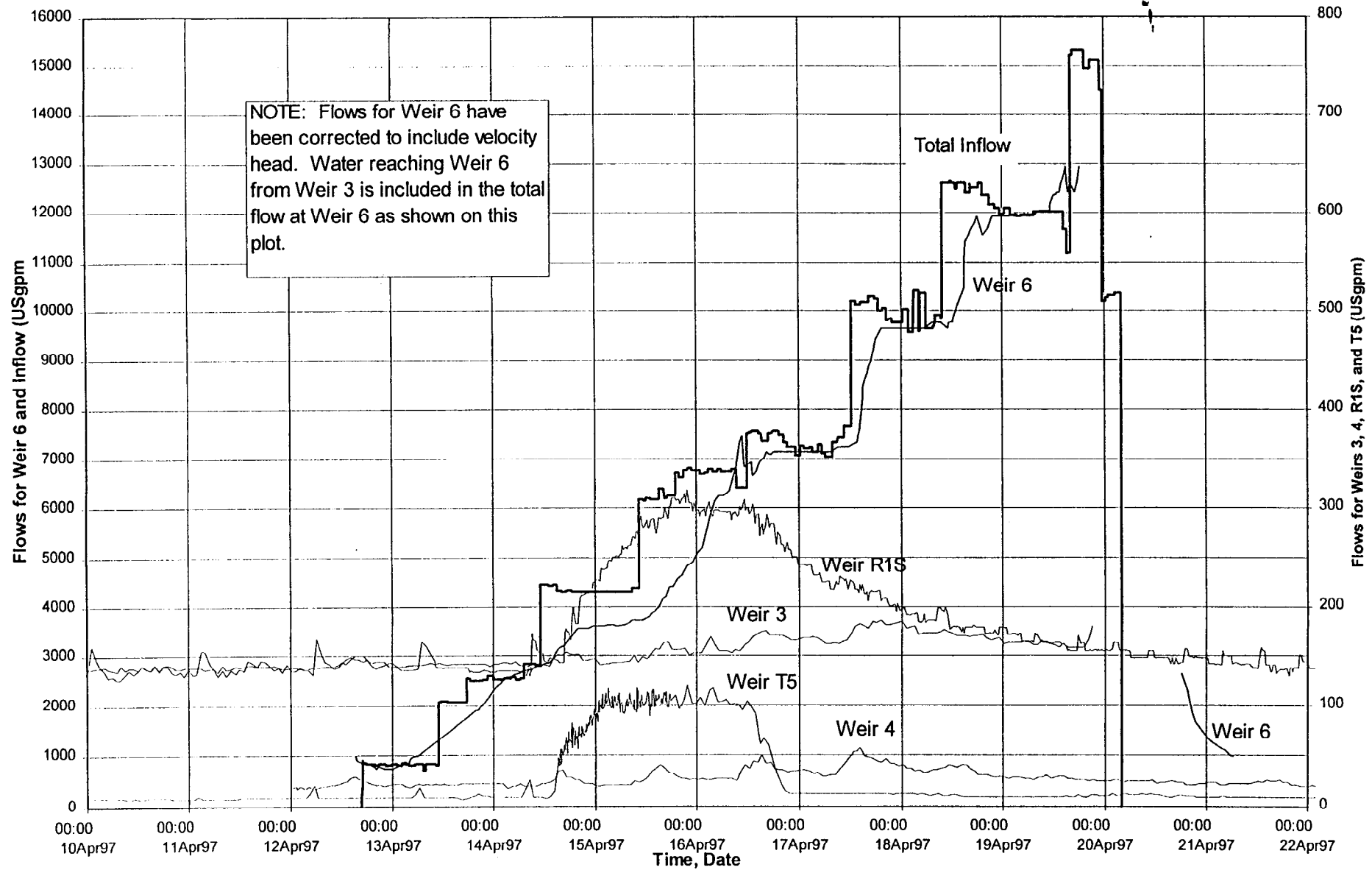
DSGN: BSP CHKD: NAM

BLANKET DRAIN INFLOW TESTS

REPORT No.: MEP452

Terrace West - Large Scale Inflow Test:
Piezometers P96-1, -2, -5 and P97-11, -22, -23, -24, -25

Fig. D-6

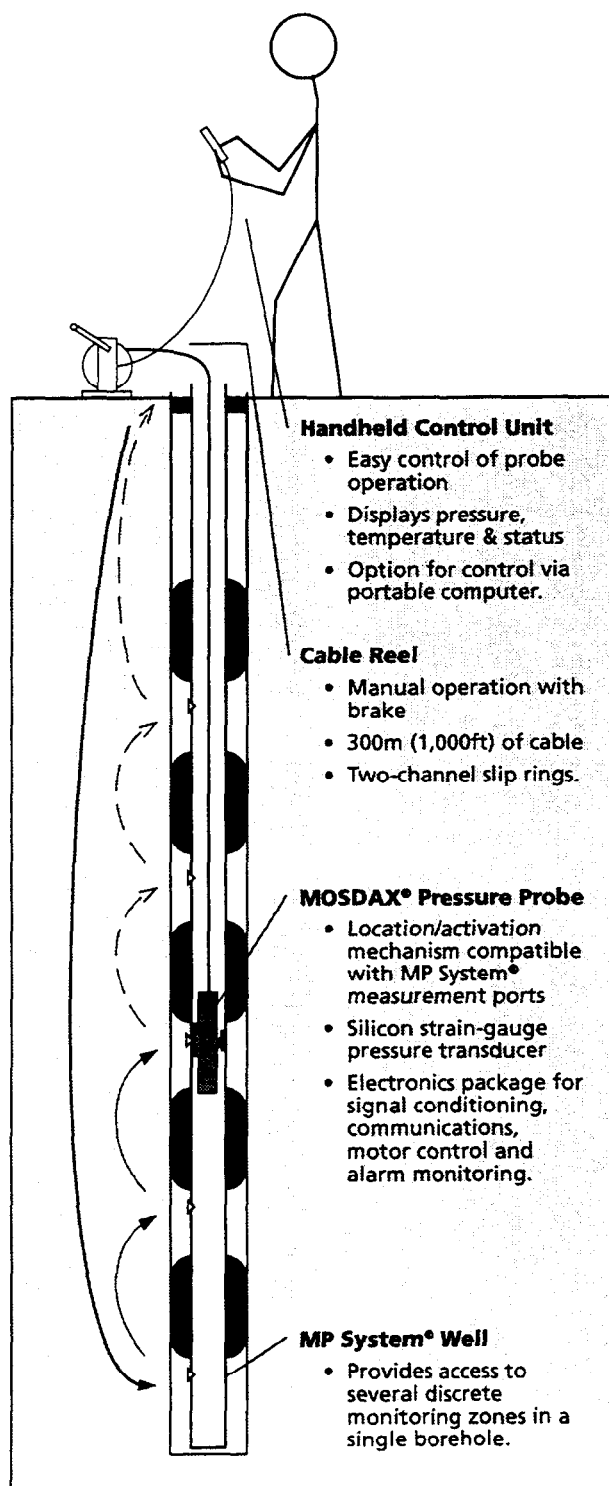


BChydro **WAC Bennett Dam**
SINKHOLE INVESTIGATION
BLANKET DRAIN INFLOW TESTS

DATE: SEPT 1997
 DSGN: BSP CHKD: NAM
 REPORT No.: MEP452

Terrace West - Large Scale Inflow Test: Weir Flow Data

Fig. D-5



Single-probe profiling with a MOSDAX® pressure probe or sampler probe is used for periodic manual measurement of fluid pressures in MP System® monitoring wells. With a single probe, pressures are measured one port at a time, beginning with the lowermost port in the well and proceeding toward the top. The figure at left illustrates the major components of the pressure profiling system.

- **Portable Probe System** — Allows one probe to be used to monitor several wells on one or more sites.
- **Digital Communication** — Provides data integrity by eliminating external interference.
- **Linearized Output** — Corrects pressure output for non-linearity and variations in temperature using calibration constants stored in the probe.
- **Interactive Display of Instrument Status** — Handheld controller provides readings of pressure and temperature plus probe status. Portable computer running MProfile™ software provides real-time plot of pressure vs. time and icons indicating probe status, alarm status and information about the monitoring well.
- **Recorded Data** — MProfile™ stores data on disk in files ready for easy conversion to popular formats (e.g., spreadsheet or comma separated values) for transfer to other applications for manipulation and analysis.
- **Documented Quality Assurance** — Simple checks to verify proper operation.
- **Seviceability** — Sensors are not permanently installed in the well and may be calibrated at any time.



Westbay®
Instruments Inc.

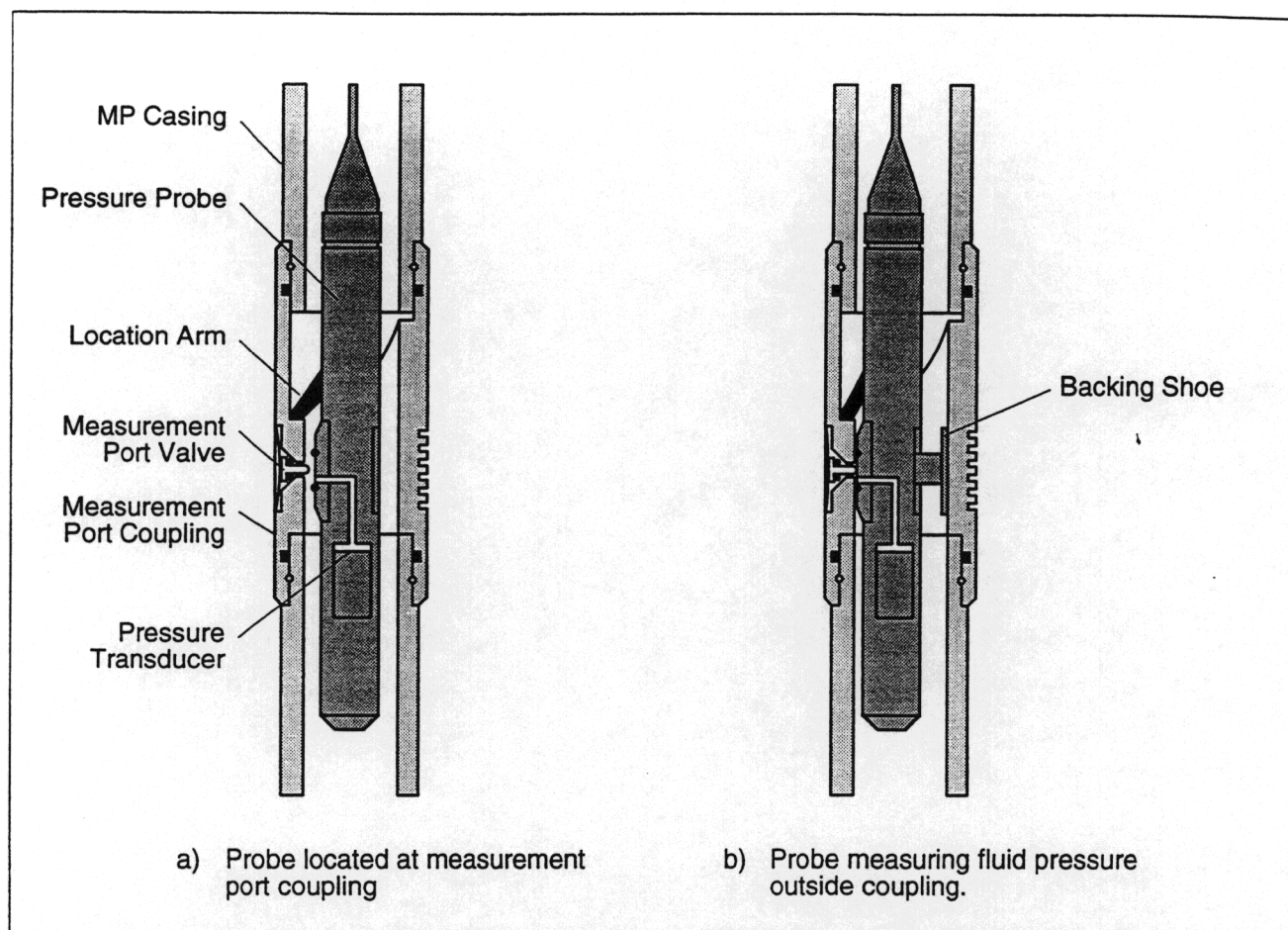


Figure 7. Operation of a pressure probe.

Testing and Monitoring

Fluid Pressure Measurements

Fluid pressure measurements can be made at each location in a borehole where an MP measurement port coupling has been installed. The measurement coupling includes a helical landing ring and a leaf spring valve which is normally closed. The fluid pressure is measured using a MOSDAX® pressure probe which incorporates a location arm, a backing shoe, a face seal, and a fluid pressure transducer. These features are shown on Figure 7. The probe is operated on a cable connected to an interface and portable computer at the top of the monitoring well. Using MProfile™ software, the computer displays the pressure both graphically and digitally, along with transducer temperature, well information and probe status (see Figure 8).

The following procedure is used to make fluid pressure measurements. The probe is lowered to a point below the first measurement port to be accessed (usually the deepest). The location arm is released from within the probe body. The probe is raised to just above the

measurement port coupling and then lowered until the location arm rests on the helical landing ring in the coupling. The weight of the probe causes it to rotate into position at the correct depth and orientation to operate the valve (Fig. 7a). At this point the pressure transducer is measuring the fluid pressure inside the MP casing at that depth. This reading will be displayed on the surface computer and is recorded. If convenient, the depth to water inside the MP casing is also measured and recorded at this time as a check on the pressure transducer.

The backing shoe is then activated. It pushes the probe to the wall of the coupling so that the face seal on the probe seals around the measurement port valve at the same time as the face of the probe pushes the valve open. The transducer is now hydraulically connected to the fluid outside the coupling and isolated from the fluid inside the casing (Fig. 7b). The reading displayed on the surface computer will be the fluid pressure in the formation outside the measurement port. The pressure outside the port can be observed as long as desired and recorded as often as desired. After the reading has been recorded, the probe backing shoe is deactivated (retracted) and the valve in the coupling reseals. The probe will again be

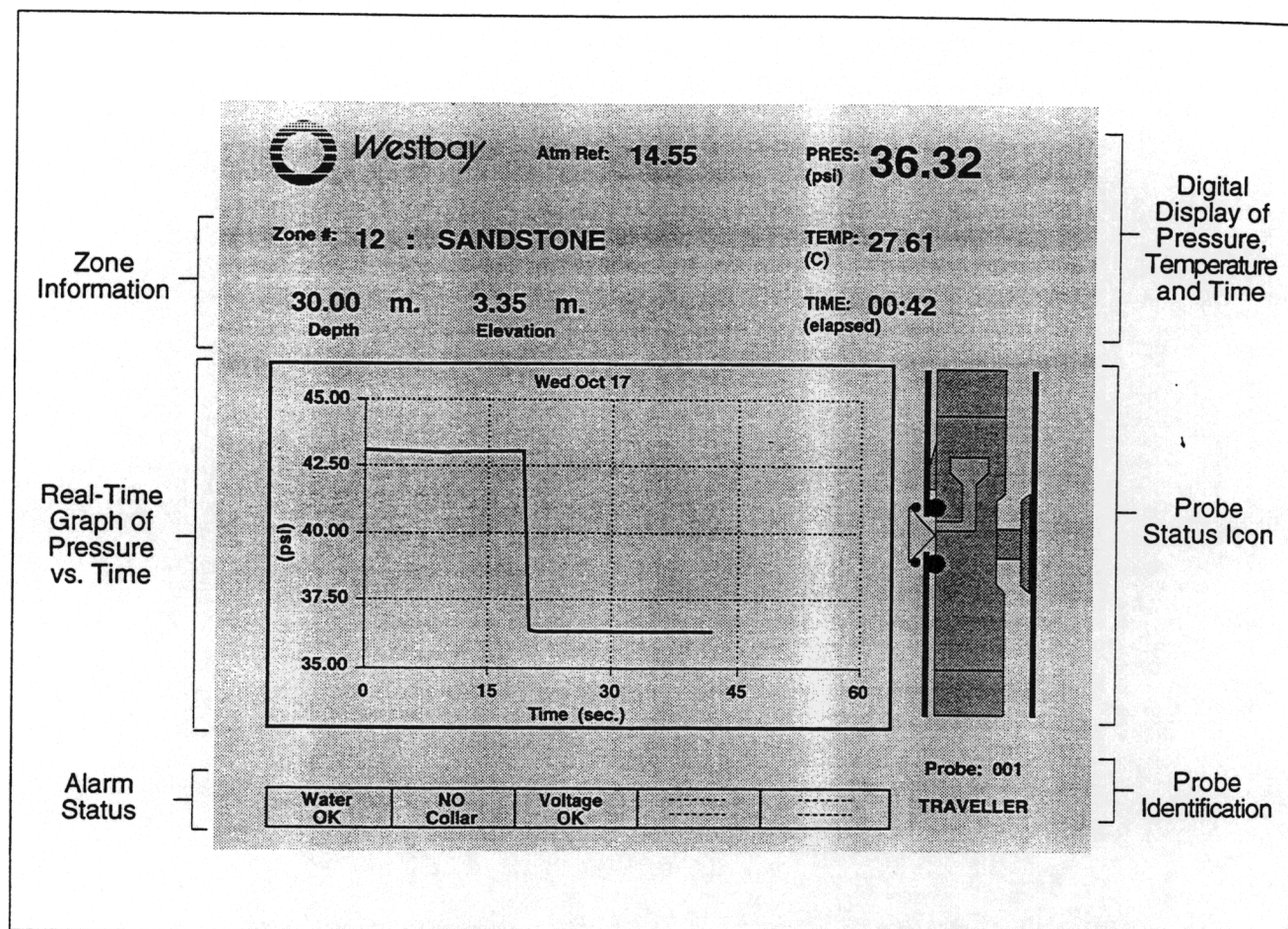


Figure 8. Data display on surface computer when using MProfile software to operate a MOSDAX pressure probe.

measuring the fluid pressure inside the MP casing (Fig. 7a). The pressure in the casing is again recorded, for quality assurance purposes.

Measuring Pressure in Low Permeability Environments

Very low permeability environments present a special challenge for measuring fluid pressures. When the routine profiling procedures described above are followed, a stable pressure may be observed through the measurement port. However, the act of opening the port may have been sufficient to change the pressure in the monitoring zone, and if the zone is very tight, that pressure change may not dissipate quickly enough to be observed. In such an environment it is always difficult to determine the validity of a static measurement unless some form of dynamic test is carried out as well. In the case of the MP System, this is done through the use of a MOSDAX sampler probe. As illustrated in Figure 9a), the MOSDAX sampler incorporates all of the features of a pressure probe, plus a valved passage which is controlled via the surface computer. With the sampling valve closed

the probe acts identically to a pressure probe and thus may be used for single-probe profiling. The difference is that once the probe is located and activated (Fig. 9b), the fluid level inside the MP casing may be adjusted to a level slightly higher or lower than the piezometric level in the monitoring zone. The sampling valve is then opened (Fig. 9c), exposing the monitoring zone to the fluid pressure in the MP casing. In very low permeability environments, no water will flow during this time. The sampling valve may be kept open for a specified period of time (such as one minute). The sampling valve is then closed (Fig. 9d) and the pressure recovery in the monitoring zone is recorded vs. time (Fig. 10). Standard analytical methods can be applied to the pressure recovery data in order to determine the apparent pressure in the monitoring zone. The same procedure can be used for testing hydraulic conductivity in low-k zones.

Pressure Monitoring Methods

The two principle methods of monitoring fluid pressure with the MP System are illustrated in Figure 11. Single probe profiling (Fig. 11a) involves an operator

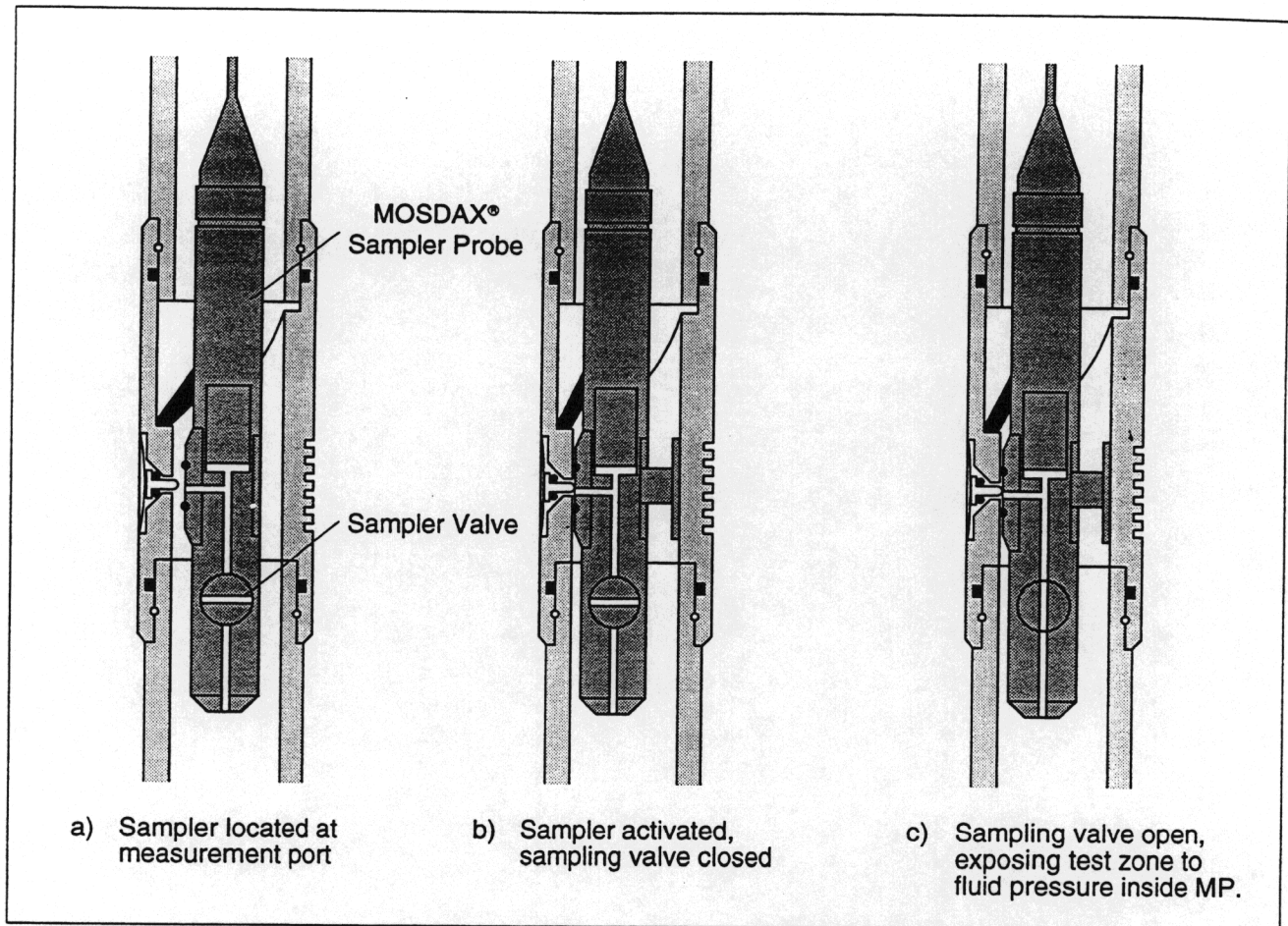


Figure 9. Using a sampler probe for testing hydraulic conductivity and verifying fluid pressure measurements in low permeability environments.

travelling to each well with a set of portable equipment including a pressure probe, cable and reel, interface and computer. The operator manually locates the probe at each measurement port and carries out fluid pressure measurements one at a time. MProfile stores the data on disk with each record tagged as to the location of the probe in the well, date, time, and probe status. Single probe profiling is generally adequate for monitoring fluid pressure up to a frequency of once per month.

When pressure measurements are desired more frequently than is reasonable for single-probe profiling, or when continual observation and recording of unanticipated events is required, the monitoring well can be configured for automated datalogging (Fig. 11b). Any or all of the measurement ports in a well may be selected for automated monitoring. Lengths of cable are made up to span the distance between each probe and the next. The string of probes and cable is assembled and lowered into the well. The datalogger and a computer are attached at the surface and the lowermost probe is located and activated in the appropriate measurement port. The

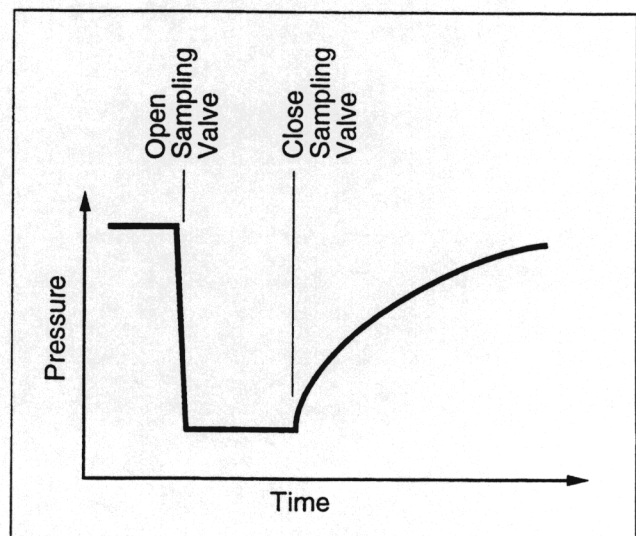


Figure 10. Typical data record from a test in a low permeability zone using sampler.

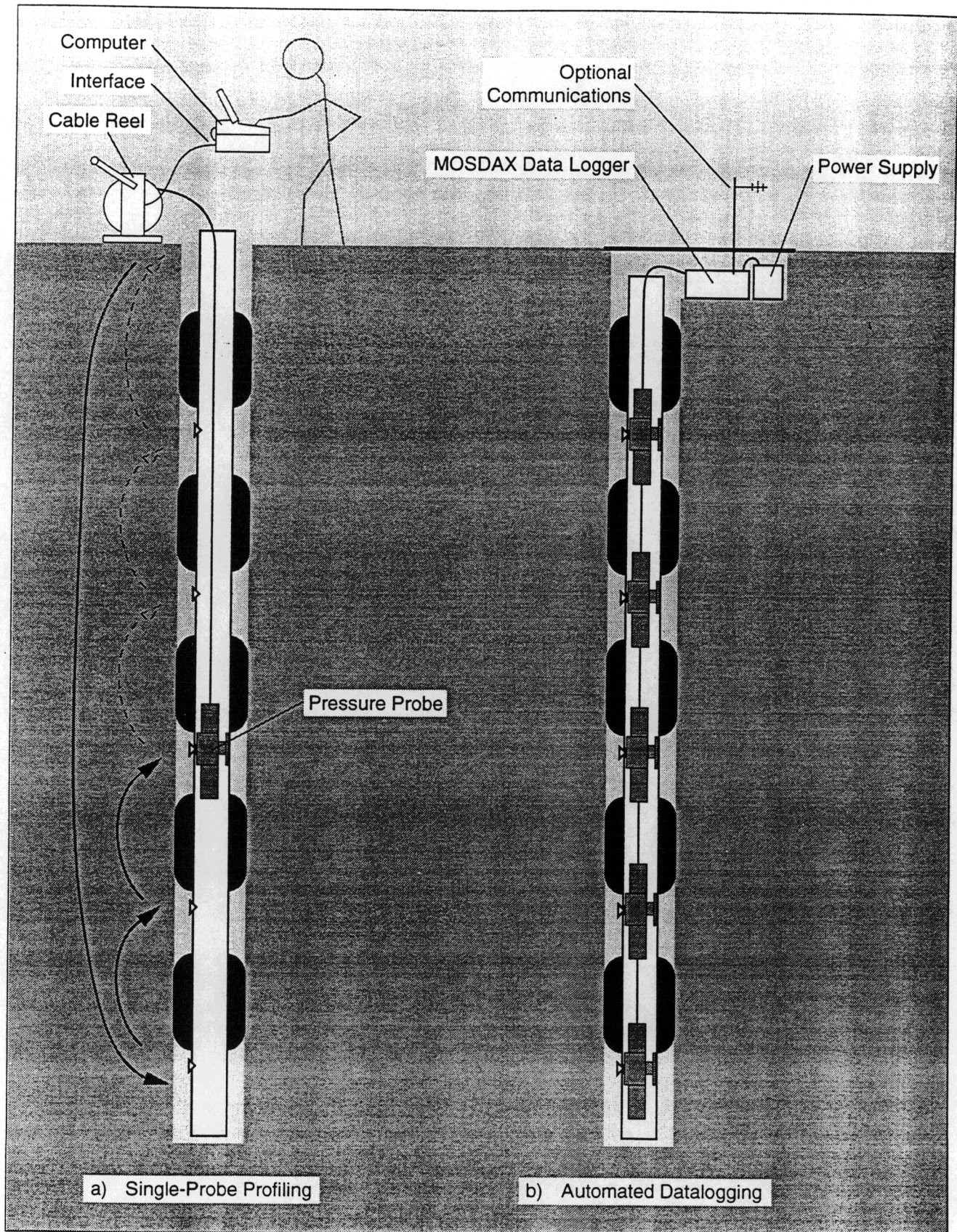


Figure 11. Methods of monitoring fluid pressure with the MP System.

remaining probes are located and activated sequentially from the bottom of the well to the top. Once all of the probes are activated, the computer is used to program the datalogger.

Recording of pressure measurements may be carried out on a simple time basis (e.g., one reading per hour or one per day), or the logger may be programmed to continually scan each probe and record pressures if a specific threshold value is exceeded. Each probe may be assigned an independent threshold (i.e., record data if probe 1's reading changes by 1 ft of water, probe 2 by 3 ft, etc.).

The datalogger may stand unattended, in which case an operator would periodically visit the site to download the stored data, or the datalogger may be connected to a telemetry system such as an RF modem, cell phone system, or landline. When connected to a communication device, a second threshold can be designated for each probe which will cause the logger to transmit an alarm signal to the host computer.

A unique aspect of monitoring in the MP System is that unusual pressure readings can often be verified by means of an in-situ calibration check. When an alarm condition is received, a natural first reaction is to question the validity of the measurement ("is it real, or is it the instrument?"). When datalogging with the MP System, if an alarm were received, the operator can log onto the well via remote communications, deactivate two or more probes including the one causing the alarm and compare their measurements of the fluid pressure within the MP casing. The column of fluid inside the MP casing is independent of all of the monitoring zones and thus serves as a reference pressure source. If the deactivated probes agree on the internal pressure, the alarm condition can be taken to be valid and the probes can be reactivated to resume monitoring. If the probe causing the alarm did not agree with the others, instrument error might be suspected. In such a case, an operator could visit the well, remove the string of probes, replace the offending probe and reinstall the string to resume monitoring. The offending probe could then be calibrated and serviced in a laboratory.

Fluid Sampling

Fluid samples are obtained by lowering a sampling probe and sample container to the desired measurement port coupling. As shown on Figure 12, the sampling probe operates in similar fashion to the pressure probe except that a groundwater sample is drawn through the measurement port coupling. Whenever the sampling probe is operated with the sampling valve closed, it is identical to a pressure probe, supplying the same data.

The procedure for taking a groundwater sample is as follows. A clean, empty sample container is attached to the sampling probe. The probe and container are prepared (e.g., evacuated) in a manner suited to the specific project and the sampling valve is closed to prevent the fluid inside the MP casing from entering the sample container. The probe and container are lowered to below the selected measurement port coupling. The location arm is released and the probe is positioned in the measurement port coupling (Fig. 12a). The fluid pressure inside the MP casing is recorded.

The backing shoe is activated and pushes the probe to the wall of the coupling so that the face seal on the probe seals around the measurement port valve at the same time as the face of the probe pushes the valve open. The interior passage of the probe is now hydraulically connected to water outside the coupling (Fig. 12b), but no fluid movement takes place. During this operation the change in fluid pressure is observed at the surface and may be recorded.

The sampling valve in the probe is opened, allowing fluid from outside the measurement port to flow through the probe and enter the sample container (Fig. 12c). The fluid displayed at ground surface drops and then recovers as the fluid in the container builds to formation pressure. Once the container is full, the sampling valve is closed (Fig. 12b), the backing shoe is deactivated (retracted) (Fig. 12a) and the fluid pressure inside the MP casing is once again recorded. The sampling probe and sample container are then pulled to the surface. The sampling probe can then be cleaned, a clean container attached and the procedure repeated.

When using a non-vented sample container, the fluid sample is maintained at formation pressure while the probe and container are returned to the top of the well. Once recovered, there are a variety of methods of handling the sample:

- the sample may be depressurized and decanted into alternate containers for storage and transport,
- the sample container may be sealed and transported to a laboratory with the fluid maintained at formation pressure,
- the sample may be transferred under pressure into alternate pressure containers for storage and transport.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, Box 1704, 111 87 Stockholm. Besöksadress: Birger Jarlsgatan 41 A

Telefon: 08-790 04 50. Telefax: 08-723 06 65. E-post: info@elforsk.se