

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Messauredammen

Dokumentation samt uppföljning av sjunkhål 1963

Rapport 99:9

MESSAUREDAMMEN
DOKUMENTATION SAMT UPPFÖLJNING AV
SJUNKHÅL 1963

Maria Bartsch

Mars 1999

Förord

VASO Dammkommitté har inlett ett forskningsarbete om inre erosion i fyllningsdammar. Arbetet genomförs i samarbete med BC Hydro, Brittish Columbia, Kanada. Samarbetet bygger på ett ömsesidigt informationsutbyte från projekt som genomförs av de båda parterna. Föreliggande projekt, som är en dokumentation och uppföljning av de sjunkhål som uppkom i Messauredammen 1963, har genomförts av Maria Bartsch och Marcus Bergman, J&W Vattenbyggnad.



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	1
EXECUTIVE SUMMARY	3
BAKGRUND OCH SYFTE	5
UNDERLAG	5
ALLMÄNT OM ANLÄGGNINGEN, UTFORMNING	5
BYGGANDE	7
Allmänt	7
Geologi och grundläggning	7
Fyllningsmaterial och packning	9
Dämningen	10
MÄTNINGAR UNDER BYGGNADSTIDEN	11
Mätningar i berggrunden	11
Teleskoprörmätningar i tät kärnan	12
SJUNKHÅL I DAMMKRÖNET ÅR 1963	15
Händelseutveckling - observationer	15
Akuta åtgärder och undersökningar	18
MÄTNINGAR OCH OBSERVATIONER EFTER ÅR 1963	24
Avvikande observationer och mätresultat 1960-tal	24
Rörelser kröndubbar t o m 1997	27
Grundvattenstånd t o m 1997	29
Georadarmätning 1996	30
SKADEFÖRLOPP - DISKUSSION OCH SLUTSATSER	30

FIGURFÖRTECKNING

<i>Figur 1</i>	<i>Plan över dammen / Plan of the dam.</i>	6
<i>Figur 2</i>	<i>Tvärsektion genom dammen / Cross-section through the dam</i>	6
<i>Figur 3</i>	<i>Längdprofil i dammläget - lösa avlagringa / Longitudinal section at the damsite – loose deposits</i>	7
<i>Figur 4</i>	<i>Krosszon i berget / Zone of crushed rock</i>	8
<i>Figur 5</i>	<i>Kornkurvor / Grain-size curves</i>	9
<i>Figur 6</i>	<i>Inklinometermätningar i berggrunden över inspektionstunneln i sektion 1/860 / Movements in bed-rock at section 1/860</i>	11
<i>Figur 7</i>	<i>Teleskoprör / Telescope tubes</i>	13
<i>Figur 8</i>	<i>Förväntade och uppmätta sättningar vid teleskoprör i sektion 1/719 respektive 1/780 / Calculated and observed settlements of telescope tubes at sections 1/719 and 1/780</i>	14
<i>Figur 9A-C</i>	<i>Sjunkhål i sektion 1/737 augusti 1963 / Sinkhole at section 1/737 August 1963</i>	16-17
<i>Figur 9D</i>	<i>Sjunkhål i sektion 1/780 augusti 1963 / Sinkhole at section 1/780 August 1963</i>	17
<i>Figur 10A-D</i>	<i>Undersökning vid sjunkhål i sektion 1/737 och 1/780 / Investigation of sinkholes at sections 1/737 and 1/780</i>	19-22
<i>Figur 11A-B</i>	<i>Återfyllning av morän på den uppschaktade delen av dammkrönet, runt sättningsställena höjdes tät kärnans krön avsevärt / Re-filling by moraine on the excavated part of the crest. The crest level was raised considerably adjacent to the settlements</i>	23
<i>Figur 12</i>	<i>Sjunkhål sektion 1/860 sommaren 1964 / Sinkhole at section 1/860, summer 1964</i>	25
<i>Figur 13</i>	<i>Uppschaktning av lösa massor pga sättning sektion 1/780 sommaren 1964 / Excavation of loose material due to settlements at section 1/780, summer 1964</i>	26
<i>Figur 14A-C</i>	<i>Rörelsemätningar av dubbar i mätbrunnar på dammkrönet / Measurements of movements in measuring wells at the dam crest</i>	28
<i>Figur 14D</i>	<i>Rörelsemätningar av dubbar i mätbrunnar på dammkrönet / Measurements of movements in measuring wells at the dam crest</i>	29
<i>Figur 15</i>	<i>Vattenstånd i teleskoprör, långtidsmätningar / Waterlevel in telescope tubes, long-term measurements</i>	29
<i>Figur 16</i>	<i>Vattenstånd i grundvattenrör belägna nedströms om dammen mellan ca sektion 1/700-1/800 / Waterlevel in piezometers downstream of the dam between sections approx. 1/700 – 1/800</i>	30

Sammanfattning

Messaure regleringsdamm är belägen i Stora Lule älv ca 30 km nordost om Jokkmokks samhälle. Dammen är en drygt 100 m hög och ca 1900 m lång zonerad stenfyllningsdamm med central tätkärna av morän grundlagd på berg. Byggnadsarbetena pågick mellan 1957 och 1963. Arbetena inleddes med att lösa avlagringar på upp till 60 m bortschaktades ned till berggrunden. Berget utgjordes huvudsakligen av gnejs och granit, men på några ställen förekom lokala svaghetszoner innehållande krossade bergartsfragment och lera.

I samband med dämningssupptagningens slutfas sommaren 1963 uppkom två stora sjunkhål i dammkrönet vid sk teleskoprör belägna ca 40 m från varandra i dammens högsta parti. Under samma tidsperiod noterades bl a vertikallrörelser och spänningsförändringar djupt ner i dammkroppen, tillfällig förhöjning av grundvattennivån i ett vattenståndsrör nedströms dammen och uppkomst av gropar i lösa jordlager nedströms dammen.

Orsaken till sjunkhålerna antogs vara piping i tätkärnans inre, mellan teleskoprören och håligheter i tätkärnan. I det aktuella området korsas dammlinjen av en större krosszon, och sprickor och håligheter antogs ha uppkommit som en följd av stora rörelser i berget i ett tidigt skede av byggnadsfasen. Med hänvisning till att dammen var välbyggd och av lämpliga material, samt att inget synligt läckage förekommit förkastades möjligheten att insjunkningarna skulle ha koppling till läckage och materialtransport *genom* dammkroppen och berget. De observationer av avvikelser som gjordes under samma tidsperiod kommenterades inte vidare.

Under de närmast följande åren efter idrifttagningen gjordes ett antal observationer av mindre kollapssättningar i dammkrönet vid teleskoprör, tillfälligt förhöjda grundvattenstånd, uppkomst av gropar nedströms dammen etc. Dessa observationer finns dock endast bristfälligt dokumenterade.

Med dagens erfarenheter av sjunkhål och inre erosion i fyllningsdammar som bakgrund förefaller det inte osannolikt att koncentrerat läckage har förekommit tvärs dammen. Nedan beskrivs ett skadeförlopp vilket bedöms vara rimligt med utgångspunkt från de avvikande mätvärden och observationer som gjorts i de aktuella sektionerna samt liknande erfarenheter från zonerade fyllningsdammar. Inom parentes redovisas mätningar och observationer som stöder det angivna händelseförloppet.

Skadeförlopp

- lokala sättningar i berggrunden där den stora krosszonen skär dammen uppkommer under den tidiga byggfasen som en följd av spänningsförändringar i krosszonen vid avschaktningen och de påföljande uppförandet av dammen (krosszonen konstaterades innehålla bl a "tjocka lager av lera", bergets förmåga att uppta horisontalspänning försämrades genom avschaktningen av lösa jordlager, inklinometermätningar visade på hävning av berggrunden, plötsliga sättningsrörelser på ca 0,5 m registreras i de nedersta sektionerna av teleskopröret i sektion 1/719)
- vid slutfasen av dämningen av magasinet förmedlar teleskoprören nästan fullt magasinsvattentryck till dammens inre (dagliga mätningar av vattenstånd i teleskoprör)
- koncentrerat läckage och materialtransport uppkommer från teleskoprörens lägsta delar, via preferentiella läckvägar i tätkärnans bas, till något område med avsevärt mycket lägre vattentryck såsom nedströms stödfyllning och/eller krosszonen (i samband med besiktning av området nedströms de skadade sektionerna i början av augusti 1963 uppmäts förhöjt

grundvattenstånd i mätrör i sektion ca 1/700 strax nedströms dammtån och i sektion ca 1/680 upptäcks två gropar belägna ca 45 respektive 125 m nedströms dammtån, en rännil har upptäckts nedströms den senare gropen i juni 1963)

- öppna läckvägar i dammens tätande delar bildas genom inre erosion, läckaget *från* teleskoprören blir större än läckflödet från magasinet *till* teleskoprören varvid vattenståndet i rören sjunker undan och processen avstannar (vattnet i teleskopröret i sektion 1/737 respektive 1/780 försvinner plötsligt i juni respektive juli 1963)
- taket över håligheter vid teleskoprörens bas brister varvid den öppna läckvägen blockeras (i juli år 1963 registreras spänningsökningar i sektion 1/780 ca 70 m under dammkrönet samt sättningar i de nedre delarna av teleskoprören i sektion 1/737 och 1/780)
- kollapssättningar fortplantas ryckvis uppåt och material dras ned utmed rören, i samband med att tät kärnans övre delar vattenmättas uppkommer insjunkningar i dammkrönet (teleskopenheterna gick isär undan för undan tills sättningarna nådde dammkrönet i månadsskiftet juli-augusti år 1963, sjunkhål konstateras vid teleskoprören i sektion 1/737 och 1/780)
- vattenståndet i teleskoprören stiger och förmedlar åter högt vattentryck till dammens inre; processen påbörjas ånyo (teleskoprören fylls manuellt med vatten i slutet av augusti 1963 varvid vattenytan ställer in sig i nivå med magasinets vattenyta, under sommaren 1966 uppmäts bl a betydande ökning av läckageflödet till inspektionstunneln vid sektion 1/738, ytterligare sättningar på dammkrönet i sektion 1/780 samt förhöjd grundvattenyta med 2,3 m i mätrör i sektion 1/780 ca 50 m nedströms dammtån)
- insipprande läckvatten för med sig finmaterial in i rören vilka gradvis slammar igen (bottennivån i teleskoprören konstateras vid mätning under 1990-talets mitt ligga endast några meter under dämmningsgränsen, rören saknar skyddslock varför material sannolikt fyllts på även uppfifrån)

Då tätjorden runt teleskoprören packades med annan packningsmetod och vid lägre vattenhalt än den övrigt tätjorden, vilken våtpackades, har sannolikt konsoliderings- och vattenmättnadssättningar bidragit till att insjunkningar uppkommit i jorden runt ett flertal av teleskoprören. Större sjunkhål uppkom dock endast vid teleskoprören i anslutning till den stora krosszonen.

Är då dammen "säker" idag? Teleskoprören i de aktuella sektionerna är numera igenslammade och "injicerar" inte längre högt vattentryck till dammens bas, varför den ursprungliga *koncentrerade* pådrivande lasten inte längre existerar. Dock kvarstår troligen vissa ärr i dammens djupt belägna delar och i krosszonen, dvs vissa defekter i dammens tätande element föreligger troligen. Liksom för alla dammar innebär vattenlasten från magasinet att naturlig genomläckning alltid pågår. Detta medför att långsamma erosionsprocesser i dammen eller grunden kan förekomma. Det har visat sig att sådana långsamma läckageförlopp med ringa materialtransport plötslig kan accelerera och orsaka tillfälliga läckagetoppar, snabba erosionsförlopp och kollapssättningar för att sedan genom självläkning och/eller akuta åtgärder åter avstanna. För att möjliggöra, och helst säkerställa, att eventuella långsamma eller snabba, tillfälliga eller permanenta förändringar i dammens inre upptäcks, helst i ett tidigt skede, krävs att dagens övervakning skärps.

Executive summary

The Messaure Dam. Documentation and Evaluation of Sinkholes 1963.

The Messaure Dam is situated on the river Stora Lule Älv approximately 30 km north-west of the municipality of Jokkmokk. The dam is a zoned rockfill dam with a central moraine core founded on rock. It is 101 m high and 1900 m long. The construction works were carried out between 1957 and 1963. The first step was to excavate loose deposits which covered the bedrock to a maximum depth of as much as 60 m. The bedrock consisted mainly of gneiss and granite, although local weak zones of fractures filled with clay and crushed fragments of rock also occurred.

In the summer of 1963, when the first filling of the reservoir was almost completed, two large sinkholes with a volume of some 10 m³ each appeared in the dam crest adjacent to telescope tubes. The sinkholes were situated some 40 m apart at the highest section of the dam, where a large fracture zone intersects the dam axis. At the time, a number of other observations were made in the same section of the dam. These included the registration of vertical movements and changes in stress conditions at great depth in the dam body, a temporary increase in groundwater level in a piezometer downstream of the dam and the appearance of cavities in loose earthstrata downstream of the dam.

The cause of the sinkholes was assumed to be piping between the telescope tubes and cavities in the core. It was assumed that cavities and cracks had developed at the beginning of the construction period, due to large movements in the foundation adjoining the fracture zone. The possibility that the sinkholes were the result of leakage and material transport *through* the dam body was rejected on the grounds that the dam was properly designed, well-built and constructed of suitable materials. The observations of deviations from expected performance that were made at the time were not given further consideration.

During the first few years of operation some observations of unexpected dam performance were made. These included small collapse settlements in the dam crest close to telescope tubes, temporary increases in ground water levels in piezometers, the appearance of cavities downstream of the dam, etc. However, the documentation available on these observations is very limited.

In light of today's experience from sinkholes and internal erosion within embankment dams, it appears likely that leakage did occur through the dam. A hypothetical course of events is presented below based on the observations made and measurements taken at the dam as well as on lessons learnt from similar zoned embankment dams. Measurements and observations that support the suggested course of events are presented in brackets.

Hypothetical course of events

- As a result of changed stress conditions within the bedrock during the first phase of construction, due to excavation of the loose deposits and the following construction of the dam, local settlements appear in the foundation where the major fracture zone in the bedrock intersects the dam axis (*investigations show that the fracture zone contains "thick layers of clay", the excavation of loose deposits reduces the ability of the foundation to carry horizontal stresses, inclination measurements indicate heaving of the bedrock, registration of sudden settlement of approx. 0.5 m in the lower parts of the telescope tube at section 1/719*)
- At the end of the first filling of the reservoir the telescope tubes transfer almost full reservoir pressure into the dam core (*daily measurements of water level in telescope tubes*)

- Concentrated leakage and material transport take place in preferential leakage paths which connect the lower end of the telescope tubes and certain areas with considerably lower water pressure, such as the downstream supporting fill and/or the fracture zone in the bedrock (*an examination of the area downstream from the damaged sections at the beginning of August 1963 shows a higher ground water level in a tube just downstream of the dam toe at section 1/700 and two cavities approx. 45 and 125 m downstream of the dam toe are discovered at approx. section 1/680, in June 1963 a runnel is discovered downstream from the latter*)
- Open leakage paths in the sealing parts of the dam are formed by internal erosion, the leakage from the telescope tubes becomes larger than the leakage from the reservoir to the tubes causing the water level in the tubes to fall (*the water in the telescope tubes at sections 1/737 and 1/780 suddenly disappears in, respectively, June and July 1963*)
- The roof over cavities at the lower end of the telescope tubes falls in and blocks the open leakage paths (*registration of increased stresses approx. 70 m below the dam crest in section 1/780 and settlements in the lower parts of the telescope tubes at sections 1/737 and 1/780 in July 1963*)
- Collapse settlements gradually propagate upwards and material is dragged down along the tube. Finally when the upper parts of the core become saturated, depressions appear in the crest (*measurements show that the telescope units gradually parted until the settlement reached the dam crest at the end of July 1963 in the form of sinkholes at sections 1/737 and 1/780*)
- The water level in the telescopic tubes rises and high water pressure is once again “injected” into the core; the process may restart (*at the end of August 1963 the telescope tubes are filled manually with water, the water table in the tubes remains at approx. the same level as in the reservoir, during the summer of 1964 settlements occur around the telescope tubes at sections 1/780 and 1/860, during the summer of 1966 observations are made of a sudden increase in the leakage flow to the inspection tunnel at section 1/738, additional settlements of the dam crest at section 1/780 and an increase in water level of 2.3 m in a piezometer at section 1/780 approx. 50 m downstream of the dam toe*)

The fact that the core material around the telescope tubes was compacted by hand with light equipment and at a lower water content than the rest of the core, where the wet-compaction method was used, has probably contributed to the formation of depressions adjacent to most of the telescope tubes. However, sinkholes of considerable size only appeared in the section where the large fracture zone intersects the dam axis.

So, what can be said about the condition of the dam today? Measurements in the mid 90s reveal that the telescope tubes are filled with granular material up to a level a few metres below the retained water level. (The tubes lack protective covers and human activity may have contributed to the material transport into the tubes.) This means that the telescope tubes do not transfer high water pressure to the base of the dam, and thus the original driving force no longer exists. However, there are probably still “scars” in the deeper parts of the dam core and in the fracture zone in the bedrock. As regards dams in general, the existence of natural seepage from the reservoir may result in the occurrence of concentrated leakage and erosive processes. With the aim of enabling and preferably ensuring detection of both slow and fast, both long term and temporary changes within the dam body, the present monitoring programme should be extended.

Bakgrund och syfte

I samband med att J&W genomförde en fördjupad dammsäkerhetsutvärdering för Messaure kraftstation år 1997 uppmärksammades att ett flertal sjunkhål uppkommit i samband med dämningssupptagningens slutfas år 1963. I arkivmaterialet fanns dokumentation över observationer vilka tydde på att läckage kan ha förekommit i området för de skadade sektionerna under de närmaste åren efter idrifttagningen av regleringsmagasinet, något som i tidigare rapporter alltid förkastats. Under 1990-talet hade även vissa avvikande mätvärden i det aktuella området observerats vilket föranlett undersökningar och ökning av mätfrekvensen av grundvattenstånd och sättningar i dammkrönet.

Syftet med föreliggande rapport är att beskriva skadeförloppet, gjorda observationer och undersökningar samt att tolka de bakomliggande orsakerna. Rapporten är i huvudsak en sammanställning av dokumentation från byggnadstiden och idrifttagningen med anknytning till sjunkhålen. Dessutom ingår observationer och mätningar med koppling till de skadade sektionerna som gjorts fram till år 1997. Avslutningsvis kommenteras, utgående från den gjorda sammanställningen och dagens erfarenheter av liknande incidenter, den hypotes om händelseförlopp och orsaker till sjunkhålen som presenterades av Vattenfall år 1963, vilken varit den hittillsvarande tolkningen av skadeförloppet och orsaker därtill.

Underlag

Underlag för rapporten har utgjorts av arkivmaterial från Vattenfall i Råcksta (dammarkivet, handlingsarkivet och ritningsarkivet). Rapporten bygger i stor utsträckning på beskrivningar och tolkningar av visuella observationer, undersökningar, beräkningar och mätningar. Inga undersökningar, beräkningar eller liknande har utförts i samband med arbetet med föreliggande rapport. Följande material ligger till grund för rapporten:

- [1]Byggnadstekniska besiktningar, inspektioner och dammätningar, -1997.
- [2]Rapporter över arbetena samt mätningar, 1958-1963.
- [3]Arbetsbeskrivning, 1958.
- [4]Anteckningar från sammanträden sommaren 1963 med anledning av sjunkhålen.
- [5]Korrespondens mellan Vattenfall och A. Casagrande, 1960-tal.
- [6]Georadarundersökning, Geo-work 1996.
- [7]"Geologiska förhållanden vid Messauredammen", A. Carlsson (1960-tal).
- [8]"The Messaure Dam ", Vattenfall Blå-vita serien 37, 1964.
- [9]Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering, 1997.

Allmänt om anläggningen, utformning

Messaure regleringsdamm är belägen i Stora Lule älv ca 30 km nordost om Jokkmokks samhälle. Älvens dalgång har spärrats av en ca 1900 m lång jord- och stenfyllningsdamm, se figur 1. Dammens tåtkärna är grundlagd på berg och högsta höjd över grundläggningsnivån är 101 m. Dammen har en central tåtkärna av morän, övergångs- och dräneringslager av sand och grus, samt stödmassor av grus eller sprängsten, se figur 2.

Dammkrönet ligger på +171 och tåtkärnans krön ligger på +166,5. Korttidsreglering är tillåten med amplituden 2,4 m mellan dämningssgränsen +265,0 och sänkningsgränsen +162,6. Uppströmsslänten lutar 1:1,75-1:2. Nedströmssläntens lutning beror av stödfyllningens sammansättning och varierar mellan som brantast 1:1,4 vid sprängstensfyllning och som flackast 1:2,3 vid grusfyllning.

Figur 1 Plan över dammen / Plan of the dam.

Figur 2 Tvärsektion genom dammen / Cross-section through the dam

Byggande

Allmänt

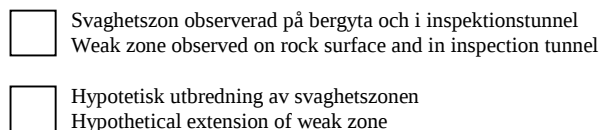
Byggnadsarbetena påbörjades 1957 och var i huvudsak avslutade 1962.

Geologi och grundläggning

I dammläget fanns lösa avlagringar bestående av postglaciala sediment, sand och silt. På den högra sidan uppgick mäktigheten till 60 m, men var betydligt mindre på den vänstra sidan, se figur 3. På grund av risk för läckage och sättningar beslutades att tät kärnan skulle grundläggas på berg. Bortschaktning av de lösa avlagringarna vid den högra dammanslutningen påbörjades 1957. Vid avschaktningen av de lösa jordlagren avtäcktes bergytan, rensades till friskt berg och avjämnades. Berggrunden utgjordes i huvudsak av gnejs och granit med relativt hög sprickfrekvens. Större ojämnheter, sprickor och slag rensades och fylldes med betong. På några ställen förekom dock lokala svaghetszoner och krosszoner innehållande krossade bergartsfragment och lera. Där dammlinjen korsades av sådana större sprickzoner utfördes armerad bottenplatta över dessa. Ett sådant ställe fanns vid sektion 1/719 där sprickzonen var ca 10-15 m bred vid tät kärnan, men bredare mot nedströmssidan. Invid denna krosszon var berggrunden indelad i kubliknande block, och materialet i krosszonen bestod av hårt packad morän.

Figur 3 Längdprofil i dammläget - lösa avlagringar / Longitudinal section at the damsite – loose deposits
A: Grus och Grovsand / Gravel and Coarse Sand B: Mellan och Finsand / Medium and Fine Sand
C: Silt

När avschaktningen färdigställts 1959 drevs en inspektionstunnel mellan sektion 1/500 och 1/860 ca 25 m under bergnivån. I samband med utsprängningen av tunneln upptäcktes en större krosszon som innehöll ”tjocka lager av lera och ett antal kloritzoner”. Denna krosszon var troligen den krosszon som iaktogs på bergytan vid sektion 1/719, se figur 4.



Figur 4 Krosszon i berget / Zone of crushed rock

Berggrunden injekterades i dubbla rader vid tätkärnans uppströmssida till ca 25 m djup. Injekteringsarbetena utfördes dels från den avtäckta bergytan och dels från inspektionstunneln.

Mätningar av tryckspänningar i berget visade att mycket stora horisontalspänningar förekom i berggrunden, även nära bergöverytan, och att ett jämviktsstillstånd rådde mellan vertikal- och horisontaltrycken. Dessa kunde inte bli högre än ett visst värde beroende på den vertikallastning som berget på den aktuella nivån utsattes för.

Kommentarer angående berggrundens tätande funktion

Det kan konstateras att den omtalade krosszonen är omfattande och inte särskilt väl känd. Vid skador och/eller ofullkomligheter i tätskärmen eller bottenplattan över krosszonen, skulle denna kunna fungera som transportväg för ett eventuellt koncentrerat läckage. Transport av finmaterial som finns avlagrat i krosszonen skulle kunna öka dess genomsläpplighet.

Den omfattande avschaktningen av lösa jordlager kan ha haft till följd att ytbergets förmåga att uppta horisontaltryck minskade avsevärt och en sönderbrytning av berget på grund av detta inte är osannolik. I samband med att dammfyllningen sedan påfördes kan detta ha lett till att berget under dammen satte sig någonstans där den stora krosszonen korsar dammen mellan de aktuella sektionerna. Lasten från dammfyllningen kan ha orsakat en sönderbrytning av en bergkonsol och/eller av den täckande betongplattan, i kombination med sammanpressning av det leriga materialet i krosszonen.

Fyllningsmaterial och packning

Kornkurvor över materialet i tätkärna, övergångslager och nedströmsfilter visas i figur 5.

Figur 5 Kornkurvor / Grain-size curves

a) Tätkärnans material, zon A / Core material, zone A b) Övergångszonernas material, zon B / Transition zone material, zone B c) Nedströmsfiltrets material, zon F / Downstream filter material, zone F

Tätkärna - zon A

I gränslagret mot berg eller betong användes sorterad morän 0-10 mm vilken packades vid optimal vattenhalt enligt Proctor. Lagrets tjocklek varierade mellan 10-50 cm beroende på bergets ojämnheter. Moränen över gränslagren våtpackades med bandtraktorer i 25 cm lager vid en vattenhalt ca 4-5 % över den optimala, vilket gav moränen en plastisk konsistens. Största tillåtna stenstorlek var 25 cm. Stenhalten visade sig dock vara större än förutsett och det konstaterades att ”det var mycket svårt att hinna med stenplockningen”.

Moränen var av jämn kvalitet med avseende på K-värde och kornstorleksfördelning. Packningsgraden kontrollerades så att den uppgick till lägst 95 % av Proctor. Det påpekas att ”där ej godkänt resultat erhållits har ompackning skett” samt att ”ompackning har måst ske i rätt stor omfattning”.

Övergångslager, filter och dräneringslager - zon B och zon F

Övergångslager, filter och dräneringslager utlades i 25 cm tjocka lager och torrpackades. Packningsgraden skulle uppgå till 95-97 % av den maximala packningsgraden enligt den modifierade Proctormetoden.

B-massorna utgjordes av schaktmassor och täktmassor huvudsakligen bestående av mellansand och grovmå, men både finare och grövre fraktioner förekom. Materialets K-värde varierade betydligt beroende på lagerföljderna i schaktet. F-massornas sammansättning var tidvis av ”mycket varierade beskaffenhet” beträffande gradering och K-värde. Hög sten- och blockhalt förekom. Pga tidvis eftersläpning av nedströmsfyllningen uppkom även ”betydande separation” i filtermaterialet och packning av filtermaterialet kunde ej utföras närmast E-zon.

Uppströms stödfyllning - zon D

Uppströms stödfyllning utgjordes av stenigt grus vilket packades vid optimal vattenhalt. Tidvis användes även schaktmassor av blockig grusig morän vilka våtpackades.

Nedströms stödfyllning - zon C och E

Grusfyllningen packades vid optimal vattenhalt till 95 % av den maximala packningsgraden enligt den modifierade Proctormetoden. Pga brist på grus användes tidvis osorterade schaktmassor med inlagda horisontella filterlager i nedströmsfyllningen.

Sprängstensfyllning utlades i 1-1,5 m tjocka lager och vattenspolades. Delar av sprängstensfyllningen utlades som vinterfyllning, då utan vattenspolning. Det påtalades att fyllningen vintertid ”går så långsamt och med så långa uppehåll att snö och is i stor omfattning kommer in i zonen”.

Kommentarer angående dammkroppens tätande och filtrerande funktion

Det kan konstateras att stora variationer förekommit avseende korngradering och K-värde. Vid kontroll av packningsgraden har låga värden förekommit varför ompackning har krävts. Det är oklart i vilken omfattning lösare zoner ändå kan ha byggts in i tätkärnan. På grund av de stora variationerna i korngradering uppfylls ej dagens filterkriterier. Vid jämförelse av fina kornkurvor för basmaterialet (B-zon) och grova kornkurvor för filtermaterialet (F-zon) är filterfunktionen otillräcklig. Det är även så att de finaste kornkurvorna för övergångsmassorna (B-zon) är finkornigare än de grövsta kornkurvorna för tätkärnan (A-zon). På samma sätt förhåller sig nedströmsfiltret (F-zon) till övergångsmassorna (B-zon). I stor utsträckning saknas totalsiktkurvor för filtermaterialet. Stenhalten har vid siktningen varierat mellan ca 1 och 60 %. Sammantaget innebär ovanstående att förekomst av lösare och mer genomsläppliga zoner i tätzonen och mer genomsläppliga zoner i filterzonen inte kan uteslutas. Vid uppkomst av läckvägar och finmaterialtransport genom tätzonen kan filtrets förmåga att initiera självläkning inte garanteras.

Dämningen

Fyllningen av magasinet påbörjades i februari 1962 och i oktober hade magasinsvattenståndet nått +145. Efter att omloppstunneln stängts i juli 1963 fortsatte dämningen och i augusti nåddes dämningensgränsen +165.

Mätningar under byggnadstiden

Mätningar i berggrunden

För kontroll av deformationer borrades inklinometerhål snett uppåt i berget från inspektionstunneln. Inklinometermätningar gjordes i sektionerna 1/500, 1/719, 1/780 och 1/860. Mätningarna påbörjades i april 1960, se figur 6. Mätresultaten var i huvudsak likartade i de fyra mätsektionerna. Mätningarna visar på att berggrunden över tunneln hävdes under lång tid efter att avschaktningen avslutats och fyllningen påbörjats. Mätningarna visade, med ett undantag, att hävningen avslutades när fyllningshöjden motsvarade de ursprungliga avlagringarnas mäktighet samt att fyllningshöjden efter detta hade mycket ringa påverkan på vertikallrörelserna i berggrunden. Den maximalt uppmätta hävningen som observerades var ca 1 dm, och inföll då fyllningen hade uppnått ungefär samma höjd som mäktigheten för de ursprungliga lösa avlagringarna. Med hänsyn till att hävningen rimligen pågick redan före mätningarna påbörjades beräknades att den totala maximala hävningen hade uppgått till ca 1,5-2 dm. Hävningen var störst i mätpunkten som var belägen längst bort från tunneln, dvs närmast (ca 15 m under) bergytan och längst nedströms (ca 25 m) om tunneln. Den enda rörelsen som observerades i tunnelbotten var en liten sättning av normal storleksordning (ca 1 mm).

Figur 6 Inklinometermätningar i berggrunden över inspektionstunneln i sektion 1/860 / Movements in bedrock at section 1/860

Kommentarer angående uppmätta bergrörelser

Mätresultaten har varit svårförklarade och deras riktighet har ifrågasatts. Det har dock inte gått att påvisa att de varit felaktiga. Det har påtalats att själva utsprängningen av inspektionstunneln kan påverkat bergspänningarna och därmed ha varit en bidragande orsak till bergrörelserna.

Teleskoprörmätningar i tåtkärnan

För övervakning av konsolideringssättningarna i den våtpackade tåtkärnan användes förutom porttrycksmätare även teleskoprör. Teleskoprören bestod av stålrör med innerdiametern 40 respektive 50 mm, se figur 7. De hade slutet botten och glidskarvar tätade med "hampdrev" (eng. "oakum"). Det ansågs dock vara troligt att skarvarna kan ha öppnat sig pga rörelserna under byggnadstiden och att vatten sålunda kunnat rinna in i rören genom dessa.

Teleskoprör placerades bl a i sektion 1/500, 1/719 (motsvarande 1/737 vid dammkrönet), 1/780 och 1/860 med början ca 15-20 m över grundläggningsnivån. Beskrivning av arbetsgången då rören byggdes in i dammkroppen saknas. Dock beskrivs att jorden runt teleskoprören lades ut för hand och packades med vibratorer, samt att packningsgraden var motsvarande som för övriga delar av tåtkärnan efter konsolidering, motsvarande en torrdensitet på 2,1-2,3 kg/dm³.

Med undantag av de lägst belägna delarna var konsolideringssättningarna av förväntad storleksordning. Mätobservationer i de lägst belägna rördelarna under de två första vinterperioderna visade emellertid på ytterligare rörelser vilka inte kunde förklaras som en effekt av konsolideringen. Dessa rörelser varierade mellan hävning på 1 % och sättning på 7 %.

Mätningarna i teleskopröret i sektion 1/719 visar på att en kollapssättning på ca 0,5 m inträffade i dammens bottenlager, se figur 8, inträffade hösten 1960. Det nämns även att jordtrycksmätningar visade på ovanligt små horisontaltryck, vilket tyder på valvbildning ovanför dem. Denna kollapssättning i fyllningen har rimligen uppkommit pga lokala sättningar i berget vid den stora krosszonen någon gång efter den första dammfyllnings-säsongen, dvs åren 1959-1960.

Mätningarna indikerade inget onormalt under dämningen förutom i sektion 1/719 och 1/780. I dessa sektioner var sättningarna mindre och mer oregelbundna än i de övriga sektionerna. Det antogs att detta hade med hävningen och krosszonen i berget att göra. Men, i samband med att magasinet nådde full dämning på sommaren 1963 uppkom plötsliga sättningsrörelser som fortplantades uppåt utmed teleskoprören.

*Figur 7 Teleskoprör / Telescope tubes
OBS! Reducerad skala! / NOTE! Reduced scale!*

Figur 8 Förväntade och uppmätta sättningar vid telekopprör i sektion 1/719 respektive 1/780 / *Calculated and observed settlements of telescope tubes at sections 1/719 and 1/780*

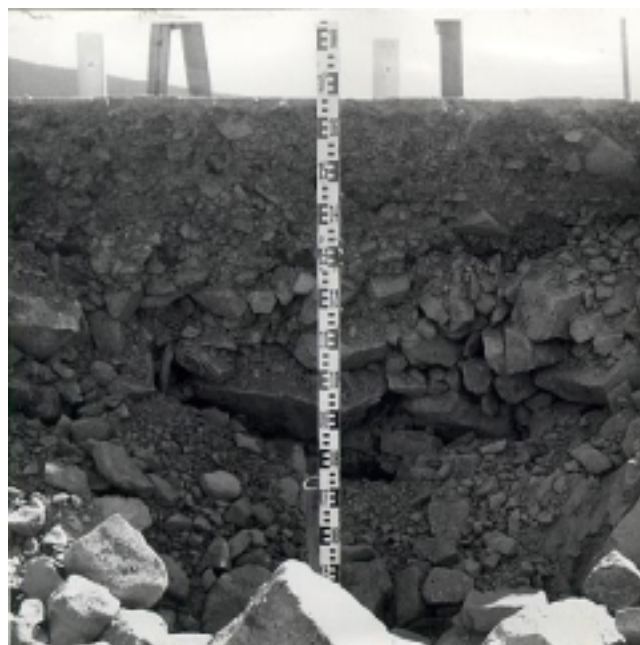
Sjunkhål i dammkrönet år 1963

Händelseutveckling - observationer

- Mätningarna av vattenståndet i teleskoprören visade att vattnet i teleskopröret i sektion 1/737 plötsligt försvann vid + 131,6 när magasinsnivån var + 148,7 i juni 1963. På liknande sätt försvann vattnet i sektion 1/780 vid +144,6 vid magasinsvattenståndet + 154,0 i juli 1963.
- 23/7 På höjden ca +101 i sektion 1/779 uppmättes följande:
 vertikaltrycket ökade från 12,3 till 14,9 kg/cm²
 horisontaltrycket tvärs dammen ökade från 0,4 till 3,7 kg/cm²
 horisontaltrycket längs dammen ökade från 1,3 till 4,0 kg/cm²
- I början av juli registrerades sättningar i teleskoprören i sektion 1/719 och 1/780. De nedersta teleskopenheterna "gick isär undan för undan" tills sättningen nådde krönet i månadsskiftet juli-augusti.
- 29/7 Ett sjunkhål upptäcktes i sektion 1/737 i direkt anslutning till teleskopröret. Sättningens djup var ca 1,5 m och dess area ca 4x2 m, se figur 9A-C.
- Nedströms dammen i sektion ca 1/680 upptäcktes en grop ca 0,5 m i diameter och ca 0,5 m djup ca 45 m nedströms släntfoten och en grop ca 1 m i diameter och 0,3 m djup ca 125 m nedströms släntfoten. Ca 1,5 månad tidigare hade en rännil upptäckts nedströms den senare gropan.
- Vattenståndsrör V5 beläget nedströms dammtån i sektion ca 1/700 visade ovanligt höga värden.
- 2/8 Ytterligare ca 10 cm sättning i sektion 1/737 upptäcktes.
- 2/8 En sättning på 8 mm registrerades i observationsbrunnen i sektion 1/780. Några timmar senare uppkom en sättning på 1,3 m i brunnens bottenparti.
- 3/8 I sektion 1/500 upptäcktes att mätbrunnens bottenring, som under en längre tid visat små sättningar, plötsligt stälpt över starkt åt uppströmssidan.
- 3/8 Vissa fortsatta deformationer observerades i mätbrunnen i sektion och 2/425, där en stark utböjning av teleskopröret uppkommit. Utböjningen av röret antogs dock inte ha uppkommit hastigt under den senast tiden utan under ett tidigare skede, dock efter 5/3.
- 4/8 Området nedströms dammen tömdes och en inspektion av nedströmsområdet visade att det synliga läckaget var litet, mindre än 1 l/s, och att ingen synlig materialtransport pågick.



Figur 9A *Sjunkhål i sektion 1/737 augusti 1963 / Sink-hole at section 1/737 August 1963*



Figur 9B *Sjunkhål i sektion 1/737 augusti 1963 / Sink-hole at section 1/737 August 1963*



Figur 9C *Sjunkhål i sektion 1/737 augusti 1963 / Sink-hole at section 1/737 August 1963*



Figur 9D *Sjunkhål i sektion 1/780 augusti 1963 / Sink-hole at section 1/780 August 1963*

Akuta åtgärder och undersökningar

Avsänkning av magasinet från strax under dämningssgränsen +165 påbörjades den 2/8 med ca 0,5 m/dygn till nivå ca +162. (Dämningen återupptogs den 22/8.)

Sjunkhålen hade uppskattningsvis en volym av drygt 10 m³ vardera. Tåtkärnan frilades mellan sjunkhålen i sektion 1/737 och 1/780 och så långt utanför dessa att oskadad överyta av kärnan nåddes (+166,5). Moränen var närmast omkring teleskoprören mycket lös och hade hög vattenhalt. I sektion 1/780 sågs resterna av ett sfäriskt valv. Kupolen hade basen på +164,5 och inuti kupolen fanns en hålighet med en höjd av ca 0,5 m. Vid sektion 1/737 återfanns resterna av en liknande kupol, vars väggar dock hade kollapsat.

Sondborrning utfördes från tåtkärnans krön runt sektion 1/737 och 1/780. Borrningarna visade att moränen under valven var lös och vattenmättad till ett djup av drygt 20 m i ett område runt teleskoprören, se figur 10. Utanför detta område var moränen mycket hård, och inga ytterligare kaviteter hittades. Den lösa jorden hade formen av ett rör med diametern ca 1 m. Under nivåerna där borrningarna avslutades var moränen hård. Man konstaterade att det var möjligt att ”röret” därunder fortsatte i en annan riktning,. Det har antagits att en större kavitet vid sektion ca 1/755 orsakat en Y-formad sättning.

Kommentarer: Sonderingen vid sjunkhålen avbröts pga att sonden inte kunde neddrivas längre. Då stora stenar tilläts i tåtkärnan skulle sondstoppet ha kunnat orsakas av en sten och behöver inte betyda att moränen här blev så hård att sonden inte kunde neddrivas under denna nivå. Då teleskopröret i sektion 1/737 lutar tämligen kraftigt skulle orsaken till att löst material endast konstaterats vid de översta ca 10 m av sonderingen vara att sonderingen ej gjordes parallellt med röret. De sättningsrörelser och spänningsförändringar som uppmätts vid teleskoprörens nederände samt faktumet att vattennivåerna när de försvann i rören var på en lägre nivå än för sondstoppen talar emot att sättningsrörelserna hade formen av ett Y.

För att undersöka tåtkärnans packning mellan de skadade sektionerna utfördes borrning med bergborr från det friladga tåtkärnekrönet. Borrningar gjordes till ca 5 m djup med centrumavståndet 2 m. De lösa partierna t o m 5 m djup var i huvudsak begränsade till områden runt teleskoprören med en ungefärlig diameter av 5 m. I de beskrivningar av sonderingsresultatet som återfunnits sägs genomgående att lös morän *endast* förekom i anslutning till teleskoprören. Vid studie av *figur* framgår dock att det även mellan teleskoprören fanns lösa partier under nivå +163 i sektion ca 1/746, 1/760 och 1/766. Detta har ej kommenterats eller lett till vidare undersökningar.

Återfyllning med morän gjordes av den uppschaktade delen av dammkrönet, se figur 11A-B. Moränkärnans krön höjdes på denna sträcka till nivå +168, dvs med 1 m. Över sättningsställena höjdes tåtkärnans krön ytterligare till nivå +170.

Figur 10A-D Undersökning vid sjunkhål i sektion 1/737 och 1/780 / Investigation of sinkholes at sections 1/737 and 1/780



Figur 11A Återfyllning av morän på den uppschaktade delen av dammkrönet, runt sättningsställena höjdes tätkärnans krön avsevärt / Re-filling by moraine on the excavated part of the crest, the crest level was raised considerably adjacent to the settlements



Figur 11B Återfyllning av morän på den uppschaktade delen av dammkrönet, runt sättningsställena höjdes tätkärnans krön avsevärt / Re-filling by moraine on the excavated part of the crest, the crest level was raised considerably adjacent to the settlements

Under dämningen mättes vattenståndet i teleskoprören dagligen. Fram till det att vattnet i röret i sektion 1/737 försvann så följde vattenståndet magasinsnivån, men låg ständigt ca 10 m under den rådande magasinsnivån. I röret fanns när vattnet sjönk undan en vattenpelare på ca 40 m. När vattnet i röret sektion 1/780 försvann var vattennivån i överensstämmelse med strömnätet. I röret fanns när vattnet sjönk undan en vattenpelare på ca 55 m. Vatten fylldes inte på i rören när det försvann. Något onormalt vattenstånd uppmärksammades inte i något annat teleskoprör.

Efter att insjunkningarna i krönet hade återfyllts fylldes teleskoprören med vatten till +163. Magasinsvattenståndet låg då på +162 varefter dämningen återupptogs. Vattenståndet i teleskoprören minskade då bara med 0,5-1 m.

Enligt program för fortsatta åtgärder skulle bl a följande undersökningar göras:

- uppgrävning av området omkring mätbrunn i sektion 1/500 så att orsaken till den nedersta ringens snedställning skulle kunna fastställas.
- inklinometermätning i teleskopröret i sektion 2/425,
- mätning av totalt vattenläckage till inspektionstunneln,
- funktionskontroll av vattenståndsror samt komplettering med eventuella ytterligare vattenståndsror

Dokumentation över dessa mätningar och undersökningar saknas dock, varför det är osäkert om de utfördes. Resultat från planerad genomgång av samtliga mätresultat från tidigare mätningar och observationer saknas även liksom ritningarna där observationerna i nedströmsområdet markerats.

Mätningar och observationer efter år 1963

Avvikande observationer och mätresultat 1960-tal

Under de närmast följande åren gjordes vissa observationer av avvikelser i det aktuella området. Observationerna finns dock endast fragmentariskt dokumenterade.

Under sommaren 1964 (21/6) uppkom ytterligare ett sjunkhål, denna gång vid teleskopröret i sektion 1/860. Den enda dokumentationen över detta sjunkhål som påträffats är det fotografi som visas i figur 12. Av fotot att döma hade det en ungefärlig utbredning av säg 1,5x1,5 m med ett djup av ca 0,5 m. Vid mätbrunnen i sektion 1/780 noterades fortsatta sättningar. Den enda dokumentation som påträffats om detta är en skiss visande ”uppschaktning av relativt lösa massor kring KTH:s rör med anledning av sättning 10/7-64” som visas i figur 13, samt några foton. Av skissen att döma var sättningen av mindre omfattning, och ca 1,5 m³ lösa massor har schaktats upp.



Figur 12 Sjunghål sektion 1/860 sommaren 1964 / Sink-hole at section 1/860 summer of 1964

Figur 13 Uppschaktning av lösa massor pga sättning sektion 1/780 sommaren 1964 / Excavation of loose material due to settlements at section 1/780, summer 1964

Ett brev daterat i november 1966 kommenteras vissa avvikande mätresultat som gjorts under året. I maj registrerades en grumling av läckvattnet i sektion 1/660 i inspektionstunneln. Analys av vattenprover visade att läckvattnet innehöll material av samma slag som fanns i krosszonen. Grumlingen kvarstod vid mätningen i oktober. I juli registrerades en betydande ökning av läckvattenflödet vid sektion 1/738 i inspektionstunneln. I september visade mätningen åter på normala värden. Under juli-augusti uppmättes en sättning av 162 mm på nivån +166,2 i sektion 1/780. I samma sektion observerades samtidigt en vattenståndshöjning på 2,3 m i mätrör V6 beläget 50 m nedströms dammtån. Vid mätningar i september hade vattenståndet återtagit normal nivå. Man konstaterade att :”Eftersom de redovisade händelserna ägt rum under delvis samma tidsperiod och är lokaliserade till samma dammområde kan det ej uteslutas att de har ett inbördes sammanhang.” (Inspektionstunneln vattenfylldes på 1980-talet.)

Två mindre gropar observerades nedströms dammen år 1967. Den ena var belägen vid ca sektion 1/250, ca 10 m nedströms stenfyllningen, och den andra vid vägen till höger om omloppstunnelns utlopp (ca sektion 1/550-1/600).

År 1969 kunde endast gropen vid omloppstunnelns utlopp återfinnas, den hade nu ökat i storlek och var 1,7 m djup och 7x10 m i utbredning. Gropen igenfylldes med grus.

Rörelser kröndubbar t o m 1997

Diagram över långtidsmätningar av vertikalarörelser visar i figur 14A-C.

Mätningarna visar ingen homogen bild av dammens sättningsrörelser. Det är inte möjligt att på basis av nuvarande mätresultat avgöra om sättningarna har orsakats av förändringar på större djup i dammen. En förklaring till de ojämna sättningarna kan vara att själva mätbrunnarna lokalt påverkar rörelserna i krönet. Detta styrks av att svackor i vägbanan uppkommit vid flera mätbrunnar. Mätresultatet visar att vissa dubbar rör sig uppåt, vilket förmodligen orsakas av tjälning. En orsak till detta kan vara att mätbrunnarna leder ner kylan, och försök att isolera brunnarna har gjorts. De lokala höjningar av tätkärnan som gjordes mellan sjunkhålen har medfört att tjälfarligt material placerats närmare dammkrönet än vad som är normalt.

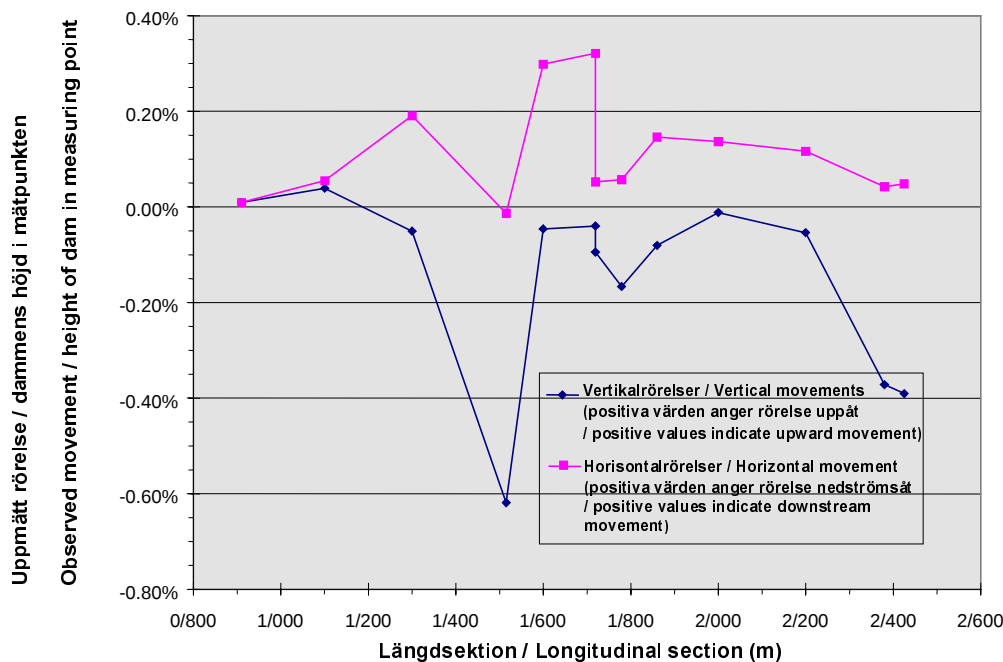
Då ett flertal av mät-dubbarna ligger intill teleskoprör kan en bidragande orsak till de ojämna sättningarna också vara att packningen utförts annorlunda kring teleskoprören än i dammen i övrigt, vilket kan ha orsakat lokalt ökade sättningar.

Kommentarer till enskilda mätpunkter:

I mätbrunnen i sektion 1/779 tilltog vertikalarörelserna under åren 1992-1995 då de uppgick till ca 50 mm. Efter år 1995 har denna snabba sättningsrörelse dock avstannat.

I mätbrunnen vid teleskopröret i sektion 1/500 har en sättning på ca 0,5 m uppkommit sedan mitten av 1970-talet. Valvbildning på lägre nivåer kan antas ha uppskjutit sättningarna i dammkrönet, vilka vid tre andra teleskoprör orsakat lokala insjunkningar under det första året efter idrifttagandet.

Figur14A-C Rörelsemätningar av dubbar i mätbrunnar på dammkrönet / Measurements of movements in measuring wells at the dam crest



Figur 14D Rörelsemätningar av dubbar i mätbrunnar på dammkrönet / Measurements of movements in measuring wells at the dam crest

Grundvattenstånd t o m 1997

Vattenståndet i de aktuella teleskoprören ligger än idag i närheten av magasinsvattenståndet, se Figur 15, varför några trender eller förändringar inte kan förväntas uppkomma. Mätningar av rörens invändiga bottennivå i 1996 visar att rören nu är igenslammade och att bottennivån ligger någon meter under dämningens gräns. Igenslamningen beror sannolikt på att material fyllts på i rören uppifrån då de saknar skyddslock, samt att porvatten strömmat in genom otäta skarvat och fört med sig finmaterial vilket avsatts i röret.

Figur 15 Vattenstånd i teleskoprör, långtidsmätningar / Waterlevel in telescope tubes, long-term measurements

I FDU 1997 påtalas en svagt ökande trend i de fem rör som ligger nedströms dammen i de aktuella sektionerna samt sedan 1994 svårförklarliga variationer i dessa rör, se figur 15.

*Figur 16 Vattenstånd i grundvattenrör belägna nedströms om dammen mellan ca sektion 1/700-1/800 /
Waterlevel in piezometers downstream of the dam between sections approx. 1/700 – 1/800*

Georadarmätning 1996

En georadarmätning utfördes i november 1996 för att bestämma nivån för tät kärnans överyta och för undersökning av dammen i stort. I det område (ca sektion 1/730-1/785) där tät kärnan höjdes i samband med undersökningarna efter insjunkningarna i dammkrönet år 1963 visade georadarmätningarna (felaktigt) på att tät kärnan låg *lägre* än i örigt. Detta medför tveksamhet beträffande de gjorda tolkningarna av mätresultaten. I samma område angavs på ca 18 m djup (+153) ett större område med lösare material.

Skadeförlopp - diskussion och slutsatser

Vattenfall hade 1963 uppfattningen att sjunkhålen inte berodde på dåligt arbetsutförande, olämpliga material eller dylikt. Förekomst av läckage och materialtransport till nedströmsfyllningen alternativt berggrunden förkastades med hänvisning till ovanstående samt att inget synligt läckage av betydelse förekommit. Utgående från undersökningarna och mätningarna som gjorts för att bestämma orsaken till insjunkningarna drogs slutsatsen att de troligen uppkommit pga piping i dammkroppen till kaviteter, vilka uppkommit pga oregelbundna sättningar i grunden vid den stora krosszonen. Hävningen av berggrunden hade bidragit till förloppet genom att skapa skjuvsprickor vilka fungerade som läckvägar mellan teleskoprören och kaviteterna. Då tätjorden vid sondering runt teleskoprören konstaterades vara lös endast till ett djup av 10-20 m antogs att en stor kavitet vid sektion ca 1/755 förorsakat en Y-formad sättningsrörelse vilken nått teleskoprören och orsakat sjunkhål vid dessa. Faktumet att onormala sättningsrörelser vid teleskoprören registrerats på lägre nivåer liksom att vattnet i rören plötsligt sjönk undan vid nivåer under de där jorden konstaterats vara lös kommenteras ej.

Endast en djupare sondering gjordes vid respektive sjunkhål. Möjliga förklaringar till att tätjorden under de översta 10-20 metrarna konstaterades var hårdare kan vara att sonderingarna här inte följde parallellt med teleskoprören, t ex så lutar röret i sektion 1/737 tämligen kraftigt, samt att tätjorden innehöll stora stenar.

I perspektiv mot dagens erfarenheter förefaller det ej orimligt att koncentrerat läckage förekommit tvärs dammen via teleskoprören. Tillfälliga läckageökningar skulle förklara gjorda observationer av perioder med förhöjda vattenstånd i grundvattenrör nedströms dammtån och grumligt och förhöjt läckage till inspektionstunneln. Detta skulle betyda att den tidigare hypotesen om skadefölloppet bör revideras. Nedan följer en uppdaterad beskrivning av skadefölloppet.

Den omfattande avschaktningen av lösa jordlager kan, då ytbergets förmåga att ta upp horisontalspänningar konstaterades vara beroende av de aktuella vertikalspänningarna, ha fått till följd att ytbergets förmåga att uppta horisontaltryck minskade avsevärt. I samband med att dammfyllningen sedan påfördes kan detta ha lett till att berget under dammen bröts sönder och satte sig någonstans där den stora krosszonen korsar dammen. Vid undersökningen av krosszonen konstaterades även att den innehöll "tjocka lager av lera". Detta skulle kunna vara förklaringar till sättningsmätningen i teleskoprör i sektion 1/719 som visar på att en kollapssättning på ca 0,5 m inträffade hösten 1960 i dammens bottenlager. Sådana stora rörelser i berggrunden och överlagrande fyllning skulle sannolikt ha skapat förutsättningar för uppkomst av preferentiella läckvägar tvärs tätzonen i detta område.

I samband med den fortsatta dämningssupptagningen har vattenståndet stigit i teleskoprören tills gradienten blivit för hög och en läckväg uppstått inne i moränkärnan mellan teleskoprörens lägre delar och via skadade delar i fyllningen/dammens bottenlager till nedströmsfyllningen och/eller krosszonen. När en öppen läckväg uppkommit från teleskoprörens lägre belägna delar har vattnet i rören plötsligt sjunkit undan, och läckaget avstannat.

Materialtransport från området runt teleskoprörens lägre delar har lett till att material dragits ned utefter teleskoprören. Sättningsrörelserna har i samband med dämningen fortplantat sig uppåt ryckvis genom omväxlande kollapssättningar och nya valvbildningar. Slutligen har de nått dammkrönet i form sjunkhål.

Avvikande packningsförfarande av jorden vid teleskoprören har sannolikt bidragit till att insjunkningar uppkommit i jorden runt ett flertal av teleskoprören. Större sjunkhål uppkom dock endast vid teleskoprören i anslutning till den stora krosszonen.

Inre erosion i dammens djupare delar kan ha orsakat differentiella sättningar i dammkroppen även utanför teleskoprörens närområde, men valvverkan i ovanliggande fyllning har förhindrat dessa att fortplantats uppåt.

De observationer som gjort av tillfälligt förhöjt samt grumligt läckage i inspektionstunneln, förhöjt vattenstånd i grundvattenrör nedströms dammen m m tyder på att tillfälliga läckageökningar förekommit även efter den första dämningen. Materialomlagringar vid öppna läckvägar har sannolikt lett till att dessa delvis satts igen. Detta har på nytt skapat förutsättningar för uppbyggnad av högt vattentryck i teleskoprören. Med tiden har igenslamning av teleskoprören och självläkning av läckvägarna i dammens djupare delar lett till att förloppet avstannat.

Är då dammen ”säker” idag? Teleskoprören i de aktuella sektionerna är numera igenslammade och ”injicerar” inte längre högt vattentryck till dammens bas, varför den ursprungliga *koncentrerade* pådrivande lasten inte längre existerar. Dock kvarstår troligen vissa ärr i dammens djupt belägna delar och i krosszonen, dvs vissa defekter i dammens tätande element föreligger troligen. Liksom för alla dammar innebär vattenlasten från magasinet och den naturliga genomläckningen att långsamma erosionsprocesser i dammen eller grunden kan förekomma. Det har visat sig att sådana långsamma förlopp plötslig kan accelerera och orsaka tillfälliga läckagetoppar, snabba erosionsförlopp och kollapssättningar för att sedan genom självläkning och/eller akuta åtgärder åter avstanna. De mätningar som ingår i dagens övervakningsprogram ger ej entydig information om tillståndet i dammens djupare delar. För att säkerställa att eventuella förändringar i dammens inre upptäcks krävs att övervakningen skärps.



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. E-post: info@elforsk.se
Hemsida: <http://www.elforsk.se>.