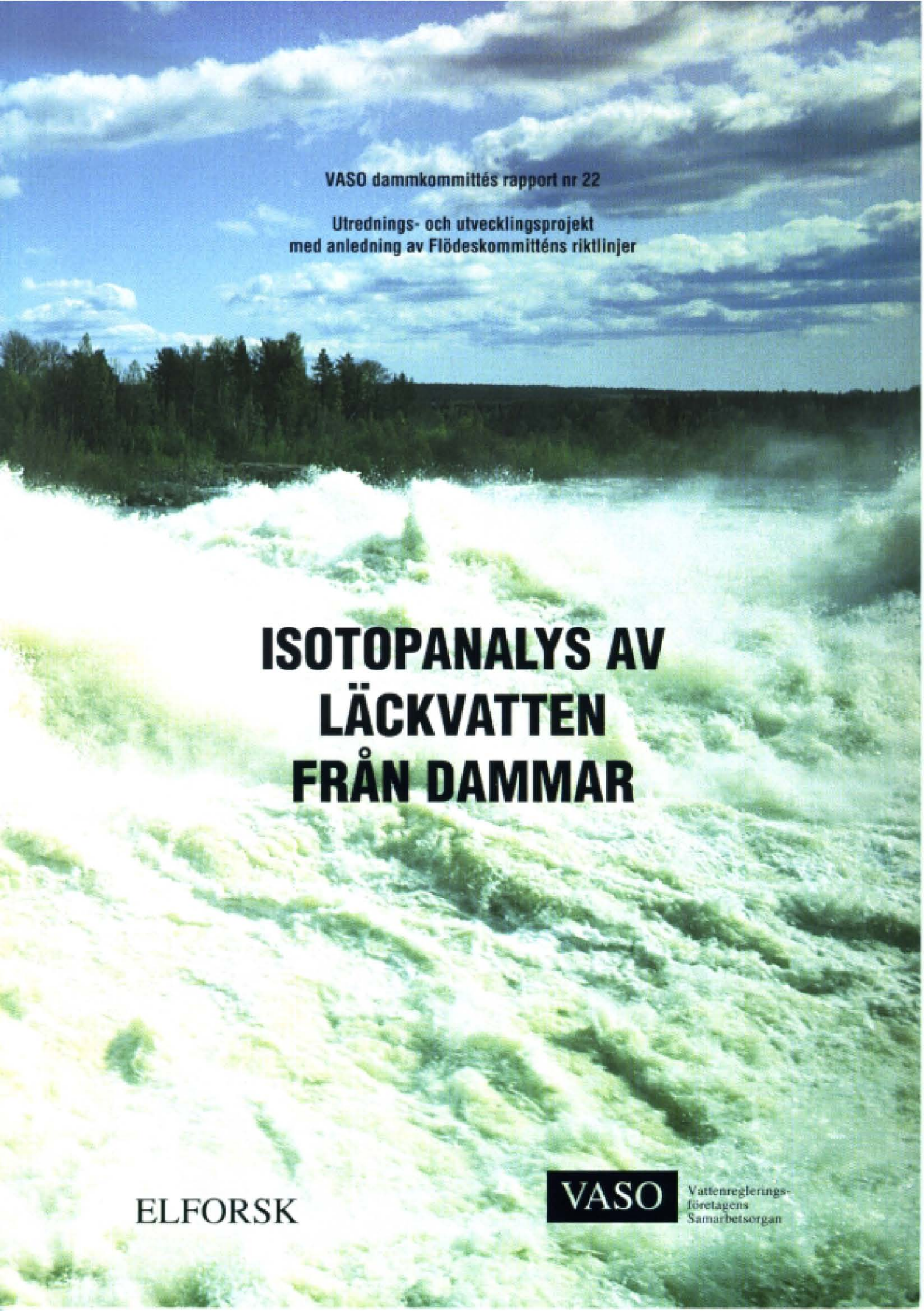


VASO dammkommittés rapport nr 22

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

ISOTOPANALYS AV LÄCKVATTEN FRÅN DAMMAR

ELFORSK

VASO Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 20

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

BEPRÖVADE METODER FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL AV FYLLNINGSDAMMAR

Åke Nilsson, VBB Anläggning AB

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

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD		i
SAMMANFATTNING		ii
SUMMARY		iii
1.	**ORIENTERING**	1
2.	**ÖVERVAKNING AV DAMMAR**	2
2.1.	**Allmänt**	2
2.2.	**Tillsyn, inspektioner och besiktning**	3
2.3.	**Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering**	3
2.4.	**Rutinschema för dammsäkerhetsövervakning**	4
3.	**INSTRUMENTERING**	5
3.1.	**Allmänt**	5
3.2.	**Basinstrumentering**	6
3.2.1.	Omfattning och mätfrekvens	6
3.2.2.	Läckagemätning	7
3.2.3.	Deformationsmätning på dammens krön och slänter	9
3.2.4.	Vattenståndsrör och portrycksmätare	10
3.3.	**Kompletterande instrumentering**	11
3.3.1.	Allmänt	11
3.3.2.	Automatisering	12
3.3.3.	Automatisk deformationsmätning	12
3.4.	**Rutiner för utvärdering av mätdata**	12
4.	**VARIATIONER I UNDERSÖKNINGSPARAMETRAR**	15
4.1.	**Allmänt**	15
4.2.	**Variationer i densitet och porositet**	15
4.3.	**Variationer i vattengenomsläpplighet**	16
4.4.	**Förändringar i vattentryck**	16
5.	**UNDERSÖKNINGSMETODER**	17
5.1.	**Allmänt**	17
5.2.	**Provgropsgrävning**	17
5.3.	**Sondering**	18
5.3.1.	Allmänt	18
5.3.2.	Viktsondering och lätt slagsondering	18
5.3.3.	Spetskraftsondering	20
5.3.4.	Hejarsondering	20
5.4.	**Borrning och undersökningar i borrhål**	21
5.4.1.	Allmänt	21
5.4.2.	Skaderisker i samband med borrning	21
5.4.3.	Utrustning för rotationsborrning	22
5.4.4.	Undersökningar i borrhål	23
6.	**UNDERSÖKNING AV ÖVERDÄMNINGSFÖRMÅGA**	25
6.1.	**Problemorientering**	25
6.2.	**Undersökningsmetoder**	25
7.	**REFERENSER**	27

FÖRORD

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

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

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

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

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

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

Föreliggande projekt har genomförts av Åke Nilsson, VBB Anläggning AB med Harald Eriksson, Sydkraft, Sam Johansson, J&W Bygg & Anläggning och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen, som styrgrupp.

I rapporten beskrivs nuvarande rutiner för övervakning och beprövad instrumentering i dammar. Vidare beskrivs de vanligaste geotekniska undersökningsmetoderna samt metoder för att speciellt undersöka överdämningsförmågan för en fyllningsdamm.

SAMMANFATTNING

Dammar har enligt praxis dimensionerats för att ha en viss säkerhet då vattenståndet ligger vid dämningsgränsen och flöden inträffar som har en återkomsttid av ca 100 år. Enligt riktlinjer från flödeskommittén skall dammar utan att allvarligt skadas kunna ta hand om dimensionerande tillrinning som har förhållandevis mycket lägre sannolikhet än vad som tillämpats traditionellt. Härigenom behöver man ta reda på dammens förmåga att tåla belastningar, t ex överdämning, som dammen tidigare förutsatts aldrig bli utsatt för. Metoder för övervakning och undersökning av dammar har därför fått ökad betydelse. Syftet med denna studie är att beskriva beprövade metoder för undersökning och övervakning av fyllningsdammar. Utveckling av "nya" metoder behandlas i ett parallellt projekt i denna rapportserie.

Dammägarna har etablerat rutiner för övervakning av dammanläggningar. Den planmässiga kontrollen omfattar tillsyn, inspektioner och besiktningar. Internationella erfarenheter och det faktum att anläggningarna blir allt äldre, har visat att det dessutom kan finnas behov av en mer djupgående utvärdering av anläggningarnas säkerhet. Vattenfall har påbörjat en sådan successiv säkerhetsgenomgång av sina viktigaste anläggningar. Utvärderingen omfattar t ex genomgång av projekteringsuppgifter och jämförelser med nuvarande riktlinjer för byggande och driftsäkerhet.

Instrumentering i form av läckagemätning, deformationsmätning av överytan och portrycksmätningar är, där så är praktiskt möjligt installera, att betrakta som "basinstrumentering" för alla fyllningsdammar av betydelse. Minskningen av personal vid dammanläggningarna, i kombination med snabb teknisk utveckling av signalöverföring och dataövervakning, har lett till att automatisering av damminstrumenteringen blivit allt mer aktuell.

Vid val av undersökningsmetod för att detektera och kartlägga omfattningen av ett område i dammens tätkärna som misstänks vara skadat av inre erosion behövs kännedom dels om normala variationer i parametrarna som skall undersökas, dels undersökningsmetodens noggrannhet. Specifikationer från byggandet tillåter t ex att moränens porositet varierar med maximalt ca 8%. Från undersökningar i en damm framgår att morän som är mycket lös och har skador från inre erosion har fått i storleksordningen 4% högre porositet än vad som tillåts i samband med byggandet.

I rapporten beskrivs de vanligaste geotekniska metoderna; provgropsgrävning, sondering och borrning. Bland sonderingsmetoderna beskrivs viktsondering, spetskraftsondering och hejarsondering. Vidare nämns några möjligheter till fältförsök som kan genomföras i borrhål och exempel på laboratorieundersökningar som kan göras på upptagna jordprover.

En indikation av viktsonderingens upplösning kan fås från ovan nämnda fältundersökning i en damm där sondering i kombination med provtagning gav en god bild av skadade partiers utbredning. Exemplet visar att viktsondering kunde registrera skillnader på ±4% i porositet.

Fältundersökningar som behövs för att bedöma överdämningsförmågan kan omfatta provgropsgrävning i dammkrönet för att bestämma nivåer för olika material och deras genomsläpplighet samt erosionskänslighet. Vidare behövs kännedom om kornfördelningen hos nedströms stödfyllning och lägen för tänkbara utströmningspunkter för bedömning av stabilitet och erosionskänslighet.

SUMMARY

The practice has been to design dams in order to provide a certain degree of safety when the water level lies at the retention level of the dam and floods occur which have a return time of approximately 100 years. According to new guidelines for design flood determination, dams should be able to cope with design flows with a much lower level of probability than the level traditionally applied without suffering serious damage, which could jeopardize the retention of the reservoir. This means that we must determine the ability of dams to withstand loads, e.g. levels higher than the normal retention level, which it was previously assumed they would never be exposed to. Consequently, it is of interest to investigate how high the reservoir can rise above the normal retention level during flood events, without the dam collapsing. The aim of this study is to describe the methods available for investigation and surveillance of earth and rock-fill dams. The development of "new" methods is discussed in a parallel project in this series of reports.

Dam owners have established routines for the surveillance of dam plants. Scheduled checks comprise regular inspections by the operators (weekly as well as a yearly reported inspection), and an engineering examination once every four years. International experience, and the fact that the dams are ageing, have also shown that a more extensive evaluation of the safety of the plants is required. Vattenfall has initiated such a successive safety evaluation of its most important plants. This evaluation includes, for example, a review of the design data and comparisons with current guidelines for construction and operational safety.

Instrumentation in the form of devices for measuring seepage, surface deformation and pore pressure is, where practically possible, to be regarded as "basic instrumentation" for all important earth and rock-fill dams. Reductions in the amount of personnel at the plants, in combination with the rapid technical development of signal transmission and computer monitoring, have resulted in the fact that dam instrumentation has become increasingly automated.

When selecting an examination method for detecting and recording the extent of an area in the impermeable core of a dam where internal erosion damage is suspected, knowledge of normal variations in the parameters to be examined is required, as well as the accuracy of the examination method.

Construction specifications, for example, permit maximum variations in the porosity of the moraine of approximately 8%. The examination of one dam has revealed that the moraine, which is very loose in some areas and has internal erosion damage, has an approximately 4% higher porosity than permitted in connection with construction.

The report describes the most common geotechnical methods, i.e. test excavation, sounding and drilling. The Swedish weight sounding method, static cone penetration testing and ram penetration testing are those sounding methods described. Field investigations that can be carried out in boreholes and examples of laboratory tests that can be performed on extracted soil samples are also mentioned.

An indication of the resolution of the Swedish weight sounding method can be obtained from the example mentioned above, where sounding in combination with sampling provided a clear picture of the extent of the damaged section.

The example shows that this method was able to register differences in porosity of ±4%.

Field investigation methods necessary to investigate how high a reservoir can rise above the normal retention level during flood events may comprise a test excavation in the crest of the dam in order to determine levels of different materials and their permeability, and to establish the susceptibility to erosion of the materials used . Knowledge of the particle size distribution of the downstream support fill, and of the position of conceivable discharge points, is also required in order to assess stability and susceptibility to erosion.

1. ORIENTERING

På samma sätt som i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden vid dammanläggningar. Enligt riktlinjer från flödeskommittén /1/ (år 1990) skall en damm utan att allvarligt skadas kunna ta hand om en dimensionerande tillrinning, som för många dammar har en betydligt längre återkomsttid än tidigare. Om dimensionerande flödet inträffar kan t ex överdämning accepteras så länge som dammen med säkerhet kan hålla uppe magasinet, dvs inte rasa. Detta nya synsätt medför att man behöver ta reda på dammens förmåga att tåla belastningar som dammen tidigare förutsatts aldrig bli utsatt för. Metoder för övervakning och undersökning av dammar har därför fått ökad betydelse.

Övervakning av dammar sker på en mängd olika sätt, vilka kompletterar varandra och avser att tillsammans ge en god dammsäkerhet. I denna studie beskrivs kortfattat nuvarande rutiner för övervakning. Förbättringar i rutinerna görs löpande för att anpassas till anläggningarna som blir allt äldre. Metoder för att undersöka åldringstendenser, dvs förändringar som sker med tiden under normala driftförhållanden och som påverkar dammens säkerhet, är därför av stort intresse.

Fjärrstyrning genomförs i allt större omfattning av vattenkraftanläggningarna i Sverige, vilket gör att tillsynen av driftpersonalen minskar. Detta leder till att automatisering och komplettering av dammarnas instrumentering blir aktuellt. Typer av instrumentering som i vissa fall kan betraktas som basinstrumentering för en fyllningsdamm beskrivs i denna studie relativt detaljerat. Kompletterande instrumenteringar, som t ex kan vara aktuella för dammar i riskklass I, beskrivs däremot endast i korthet.

När den rutinmässiga övervakningen upptäcker en förändring som kan vara ett dammsäkerhetsproblem görs normalt en utredning för att bedöma dels skadans omfattning, dels om åtgärder behöver göras för att säkerställa dammen. I denna studie beskrivs de vanligaste geotekniska metoderna som används för att undersöka indikerade förändringar. Vidare skisseras omfattningen och metoder för att speciellt undersöka förmågan att tåla överdämning för en fyllningsdamm.

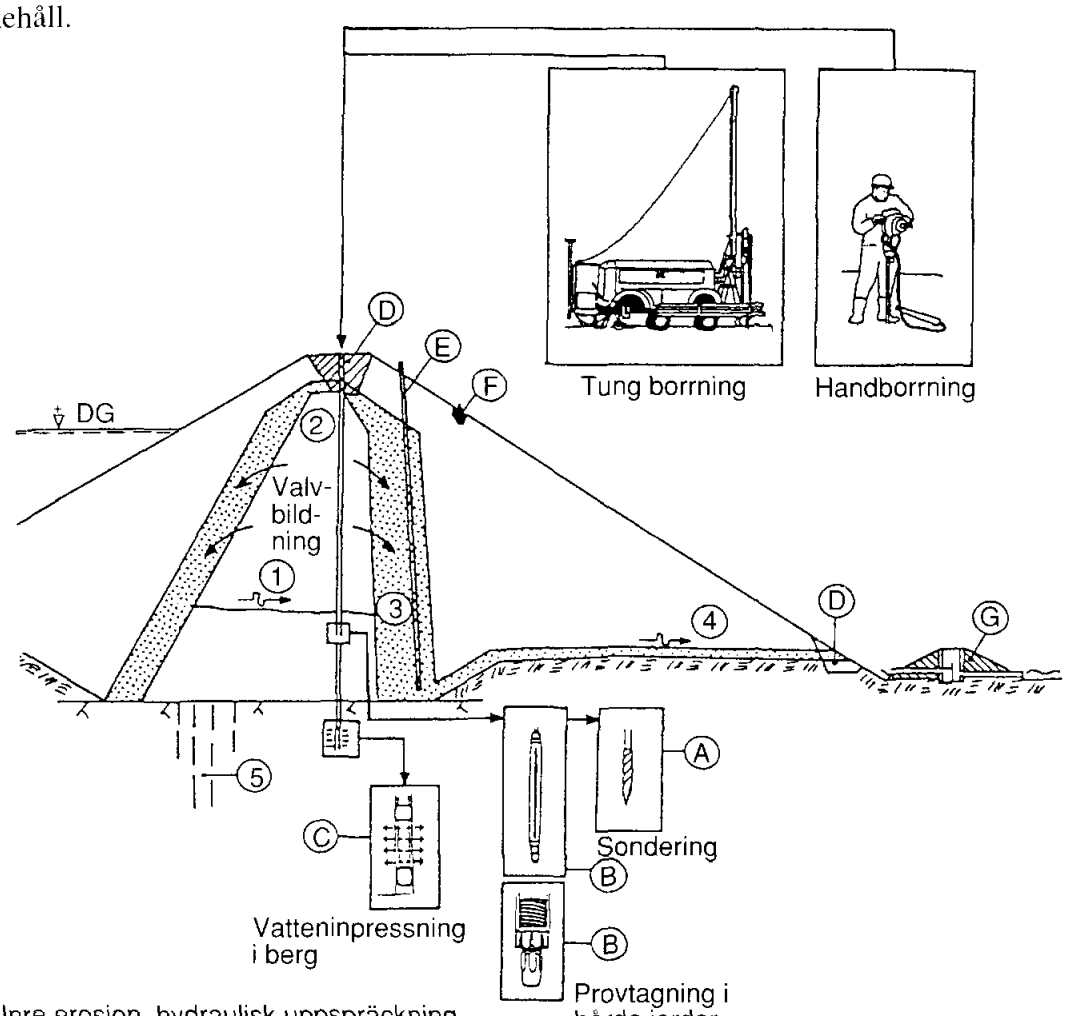
Syftet med denna studie är att översiktligt beskriva beprövade metoder för övervakning och undersökning av jorddammar, jämför figur 1.1. Avsikten är att tillsammans med motsvarande studie i ett parallellt projekt om utveckling av "nya" metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar /2/, ge en översikt över området.

Den föreliggande studien har utförts av Åke Nilsson, VBB Anläggning. Till projektet som initierats och finansierats av VASO dammkommitté, har funnits en styrgrupp bestående av Harald Eriksson, Sydkraft, Sam Johansson, J & W Bygg och Anläggning och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen.

2. ÖVERVAKNING AV DAMMAR

2.1. Allmänt

Länsstyrelsen utövar den offentliga tillsynen över säkerheten av dammar i drift. Det är dock dammägaren som har fulla ansvaret för dammens säkerhet. Dammägarna har därför etablerat rutiner för övervakning av dammanläggningarna, vilka finns dokumenterade som anvisningar från VAST /3/ och som föreskrifter från Vattenfall /4/, med i huvudsak likartat innehåll.



(1) Inre erosion, hydraulisk uppspräckning
(2) Erosion, tjälning i tätkärnans överkant
(3) Filter, igenslammat eller separerat
(4) Läckage med risk för erosion vid dammtån
(5) Injekteringsskärmens täthet försämrad

Exempel på tillgängliga metoder för övervakning och undersökning:

(A) Sondering
(B) Provtagning
(C) Borrning, infiltrationsförsök i jord och vatteninpressningsförsök i berg
(D) Provgropsgrävning
(E) Vattenståndsrör
(F) Mätdubbar för deformationsmätning
(G) Läckagemätning

Figur 1.1. Exempel på skador.

2.2. Tillsyn, inspektioner och besiktningar

Den planmässiga kontrollen av dammanläggningar är av följande slag, beroende på vem som utför kontrollen och med vilken frekvens den utförs:

Tillsyn: Utförs av driftpersonalen, dagligen, veckovis eller med annat tidsintervall beroende på typ av damm, årstid m m.

Inspektioner: Utförs i dammägarens regi en eller två gånger per år. Inspektioner utförs normalt av driftpersonalen, som bör vara särskilt utbildade i dammsäkerhetsfrågor. Inspektionen genomförs enligt en på förhand upprättad inspektionsanvisning för anläggningen.

Besiktningar: Utförs normalt vart 4:e år av en godkänd besiktningsman, som genom dokumenterad teoretisk och praktisk utbildning och verksamhet beträffande dammars konstruktion och byggande är väl kvalificerad för sitt uppdrag. Beroende på dammens omfattning och utrustning genomförs besiktningen, förutom av representant från driftpersonalen, av personer från följande fackområden: byggnadstekniska delar, mekanisk utrustning och elteknisk utrustning med automatik och fjärrövervakning. (Inre vattenvägar besiktigas normalt mera sällan; oftast vart 8:e år).

Efter varje besiktning skall en säkerhetsbedömning utföras för den aktuella dammanläggningen. Bedömningen skall göras av den dammsäkerhetsansvarige efter samråd med besiktningsmannen.

2.3. Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering

Förutom i avsnitt 2.2. listade typer av planmässiga kontroller av dammanläggningarna har internationella erfarenheter och det faktum att anläggningarna blir allt äldre, visat att det kan finnas behov av en mer djupgående utvärdering av anläggningarnas säkerhet. Utvärderingen avser att identifiera eventuella problem som nya förutsättningar, åldring etc som eventuellt inte kommer fram vid en traditionell besiktning. Vattenfall har påbörjat en sådan successiv genomgång av sina viktigaste dammar. Säkerhetsutvärderingen, vars utformning kan komma att justeras efter att ett antal utvärderingar genomförts, omfattar bl a följande punkter:

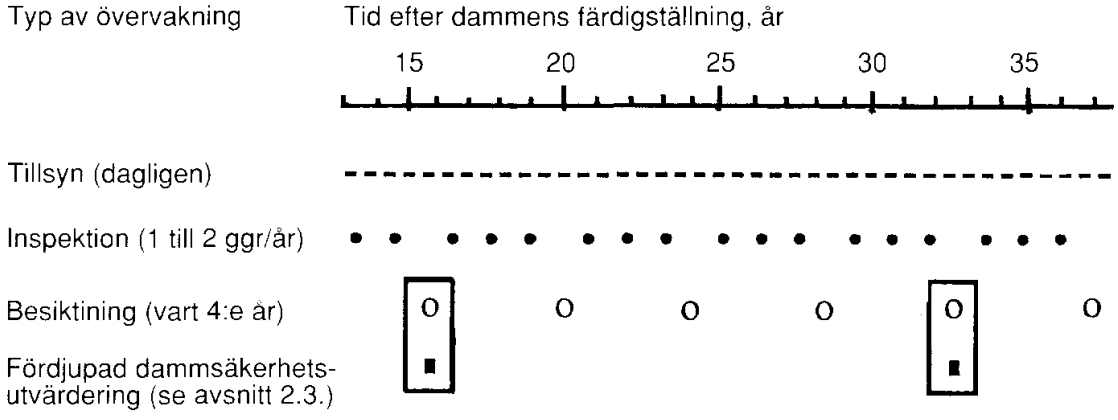
- genomgång av projekteringsuppgifter och t ex förnyade stabilitetsberäkningar med uppmätta portryck där resultatet jämförs med antaganden gjorda då dammen projekterades
- utvärdering av resultat från läckagemätningar och instrumentavläsningar
- utvärdering av rapporter från inspektioner och uppgifter om nederbörd, vattenflöde, etc
- besiktning (byggnadsteknisk, mekanisk och elektrisk).

Vid behov görs förnyade fältundersökningar och installeras nya instrument för att ytterligare bestämma om svagheter finns. Vid utvärderingarna tas hänsyn till faktorer som anläggningens storlek, ålder, läge, konsekvens vid dammbrott etc.

Utvärderingarna av dammsäkerheten utförs genom insatser från olika fackområden (byggnad, geologi/geoteknik, el, mekanik, etc), där resultaten integreras efterhand i en gemensam rapport, som på samma sätt som vid en besiktning mynnar ut i en dammsäkerhetsbedömning och förslag till åtgärder. För flertalet dammar är erfarenheten att utredning och erforderliga åtgärder kan genomföras under en 10-årsperiod.

2.4. Rutinschema för dammsäkerhetsövervakning

De olika typerna av övervakning och utvärdering av dammsäkerheten sker som ovan nämnts successivt med olika frekvens. En sammansättning av beskrivna rutinerna presenteras i följande schema:



Vid alla de listade typerna av övervakning kan behov uppstå att närmare undersökning med olika metoder eller öka övervakningen genom ytterligare instrumentering. Möjligheterna till detta behandlas i det följande.

3. INSTRUMENTERING

3.1. Allmänt

I samband med byggandet av en damm installeras vanligen instrument dels för att under byggnadstiden och första dämningen kunna bekräfta att konstruktionen fungerar som avsett, dels för att ge erfarenheter till framtida liknande dammbyggen. Instrumenteringen som behövs under denna första tid varierar mycket beroende på aktuella förhållanden som t ex tidigare erfarenhet av dammtypen, grundläggningsförhållanden, dammhöjd och klimat. För fyllningsdammar förekommer ofta följande typer av instrumentering i samband med byggandet:

- mätpunkter för mätning av deformationer på dammens krön och slänter
- portrycksmätare och vattenståndsrör för observation av vattentryck i dammkroppen och undergrunden
- mätöverfall för läckagemätning
- meteorologiska mätningar (regn, snö och temperatur).

När första dämningen har genomförts sammanfattas normalt resultaten från mätningarna i samband med en utvärdering för att avgöra om dammen med grundläggning fungerar som avsett. Ofta kan därefter mätningarnas omfattning minskas både beträffande antal mätpunkter och frekvensen för avläsningarna. Minskningen genomförs ibland successivt under de första tre åren efter dammens färdigställning och kan då göras beroende på storleken på uppmätta värden liksom trenden i mätresultaten.

Efter de första tre åren fortsätts mätningarna av de instrument som bedöms kunna ge information om eventuella förändringar i funktionen under lång tid. Målet för långtidsövervakningen är att ge en tidig varning vid eventuella skadliga förändringar, för att kunna sätta in åtgärder innan de påverkar dammsäkerheten.

Vid långtidsövervakning är det oftast tillräckligt att bedöma förändringar i säkerhetsnivån, vilket många gånger är mycket lättare än att t ex under byggnadstiden förutsäga säkerhetsnivån innan dämningen. Även vid långtidsövervakning varierar dock de yttre förhållandena (vattennivå, temperatur etc.) ofta med årstiderna, varför även uppmätta värden på t ex läckning, rörelser och vattentryck kommer att visa motsvarande variationer även då dammen fungerar normalt. Mätvärden behöver ofta bearbetas för att lättare få en säkrare utvärdering.

Instrumentering av fyllningsdammar har tidigare studerats i ett utvecklingsprojekt inom Vattenfall. I projektet behandlades instrumentering allmänt i en översikt. Vidare studerades praktikfall där dels utvärdering gjordes av resultat från befintlig instrumentering, dels där automatisering genomfördes av t ex läckagemätning vid några dammar. Projektets finns presenterat i två utvecklingsrapporter som givits ut av Vattenfall, /6/ och /7/.

I det följande beskrivs olika typer av instrumentering som används för långtidsövervakning av fyllningsdammar. Huvudsakligen tas upp olika typer av "basinstrumentering", som enligt internationell praxis i någon form bör finnas vid fyllningsdammar där konsekven-

serna vid ett eventuellt dammbrott skulle bli betydande. Olika arrangemang av läckagemätning beskrivs utförligt, eftersom det erfarenhetsmässigt visat sig att denna mätning lett till upptäckten av de flesta fallen av rapporterade incidenter som bedömts påverka dammsäkerheten. Vidare ges exempel på typer av "kompletterande instrumentering", som kan vara aktuella vid fyllningsdammar t ex i riskklass I eller där förändringar konstaterats pågå som kräver speciell övervakning.

Automatisk och ofta kontinuerlig registrering av mätningar har under senare år blivit allt mer befogat, eftersom kraftanläggningarna numera normalt fjärrstyrs. Elektronik i form av datorer för automatisk mätning och förbättrad överföring av signaler med t ex optiska fibrer, har under senare år utvecklats kraftigt. Under avsnittet kompletterande instrumentering ges exempel på automatisering av mätningar som genomförts vid några fyllningsdammar.

3.2. Basinstrumentering

3.2.1. Omfattning och mätfrekvens

Omfattningen av erforderlig instrumentering för långtidsövervakning kan inte standardiseras utan behöver anpassas till varje damm. Faktorer som kan påverka omfattning av instrumentering är bl a:

- bemanningssituation och omfattning av visuella observationer
- konsekvenser vid dammbrott
- dammens komplexitet (dammtyp, dammhöjd, grundläggning etc.)
- typ av magasinsreglering.

Ett försök att objektivt värdera bl a de ovannämnda faktorerna finns redovisat i en av ICOLD's rapporter, se /5/. Utvärderingen visar att för fyllningsdammar högre än 15 m föreslås följande basinstrumentering:

- läckagemätning
- deformationsmätning av överytan
- portrycksmätningar.

Då konsekvenserna för dammbrott är stora eller då dammhöjden är högre än 30 m föreslås kompletterande instrumentering, se nedan avsnitt 3.3.

Mätfrekvensen för läckagemätningen är beroende på läckagets storlek. Den kan variera från kontinuerlig mätning till endast ett par observationer per år om läckaget är mycket litet. Mätfrekvensen för deformationsmätningarna varieras likaså delvis efter storleken och trenden på observationerna, men görs vanligen en gång per år.

3.2.2. Läckagemätning

Mätning av läckaget genom, runt eller under en damm har erfarenhetsmässigt visat sig ge viktig information av anläggningens kondition. Till skillnad mot ett vattenståndsrör som ger upplysning av portrycket i en specifik punkt, ger läckagemätning en samlad information om förhållandena för hela eller del av dammen. En plötslig ändring i läckagemängden, utan någon uppenbar orsak som kraftig nederbörd eller ändring av magasinsnivån, kan vara en signal på läckageproblem. Observation av läckagevattnet ger också möjlighet att konstatera om vattnet blir grumligt, missfärgat eller markant ändrar sin kemiska sammansättning. Alla sådana observationer kan indikera ett läckageproblem.

Mätning av läckaget kan göras med hjälp av t ex mätöverfall, Parshall-rännor eller flödesmätare på rör. Vidare kan en behållare med bestämd volym användas för att mäta t ex utflödet från ett rör. Tiden mäts då för att fylla behållaren och flödet kan beräknas.

Mätöverfall är en av de äldsta och enklaste anordningarna för flödesmätning. Genom en förträngning med väl definierad geometri bildar man en bestämmande sektion, varigenom flödet blir en entydig funktion av vattennivån uppströms överfallet. Det förekommer ett stort antal former av skarpkantade överfall. Vanligast är triangulärt överfall med 90° öppningsvinkel (även kallad Thomsonöverfall) eller rektangulärt där bredden för öppningen väljs med hänsyn till förväntade flöden.

För att hålla mätfelen på låg nivå för mätöverfallen finns en rad krav på mätöverfallens utformning, jämför referens /8/, /9/ och /10/. För triangulära mätöverfall som anordnas i en kanal finns måttkrav enligt figur 3.1. Vid mätöverfall utformade enligt dessa anvisningar kan man räkna med att avläsning av flödet kan göras med en noggrannhet av ±2% och att absoluta felet hos flödet är mindre än ±5%.

Då mätöverfallet skall installeras vid en befintlig damm behöver oftast byggas en uppsamlande vall i dalgångens lågpunkt nedströms dammen. Vallen verkar som en fördämning för läckagevattnet som avbördas genom mätöverfallet. Läckagemätningen kommer i detta fall att påverkas markant av nederbörd och snösmältning då nederbördsområdet blir förhållandevis stort mellan dammen och den uppsamlande vallen, se figur 3.2.

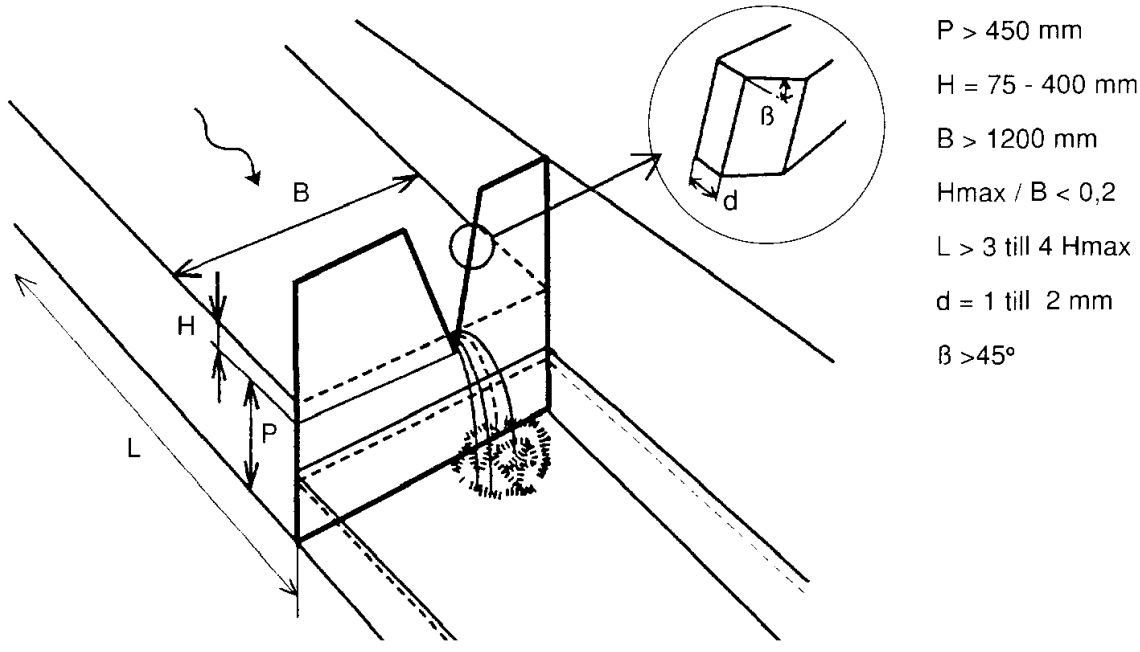
Vid regn kommer läckagemängden oftast att vara endast en del av flödet som mäts vid överfallet. Om t ex allt vatten från ett 5 mm regn över ett nederbördsområde 100 x 300 m skall avbördas vid mätöverfallet under 1 timme behövs i medeltal ett flöde av ca 40 l/s. Det är därför nödvändigt att hänsyn tas till påverkan av nederbörd och eventuell snösmältning vid utvärdering av läckagemängden. Då flödet avläses automatiskt och signalen överförs t ex till en avlägsen driftcentral kan hänsyn tas till nederbörden på följande sätt:

- Om läckage mäts i flera punkter i samma område kan vid larm från en av mätarna flöden från övriga mätare kontrolleras. Om höga värden kan avläsas även vid dessa mätare är det sannolikt att larmet orsakats av regn eller snösmältning, eftersom ett onormalt läckage inte är troligt vid flera platser samtidigt.

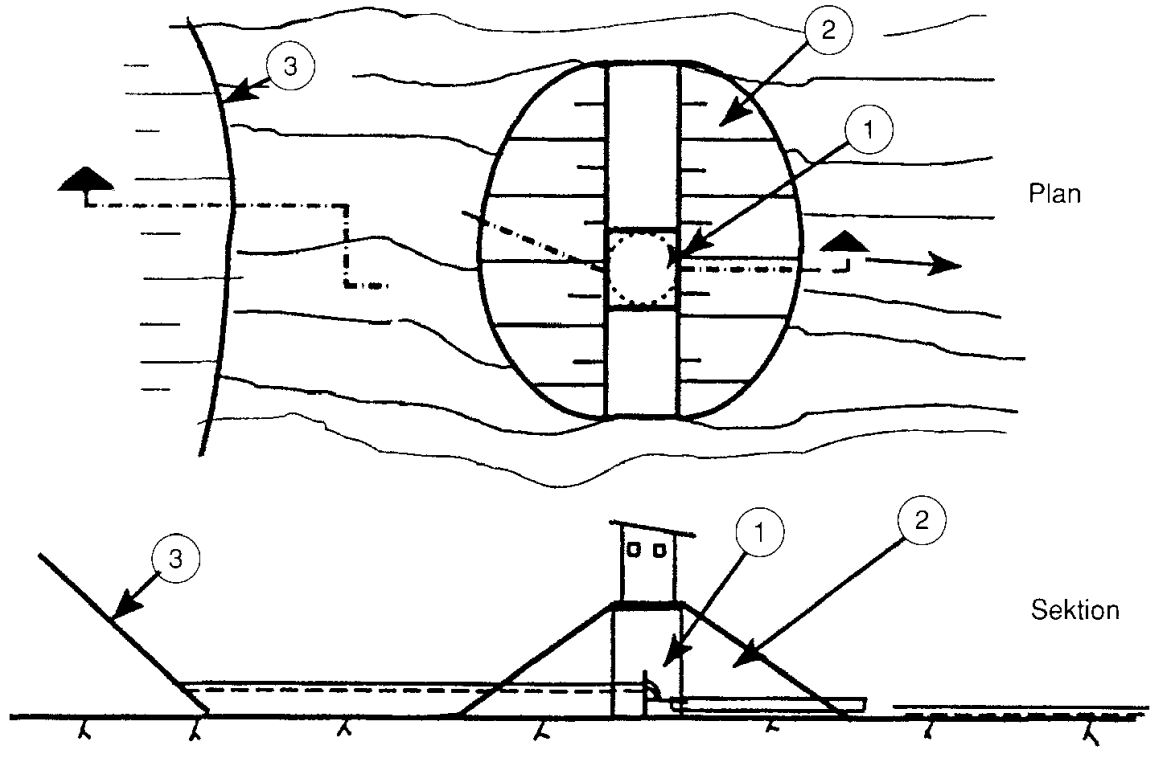
- Då läckagemätning görs endast i en punkt nedanför dammen kan man i närheten bygga ytterligare mätöverfall där flödet från nederbörd och snösmältning registreras för ett referensområde, som inte påverkas av eventuellt läckage från

dammen. När erfarenhet erhållits hur regn och snösmältning påverkar mätvärdena kan uppmätt läckage korrigeras med hjälp av uppmätt flöde från referensområdet.

- En tredje möjlighet är att komplettera flödesmätningen med mätning av nederbörd och temperatur vid dammen. Läckagemätningen kan härigenom korrigeras för regn. Vidare kan man genom att kombinera temperaturmätningarna med observationer av snödjup bedöma möjligheten för snösmältning vid ett eventuellt larm.



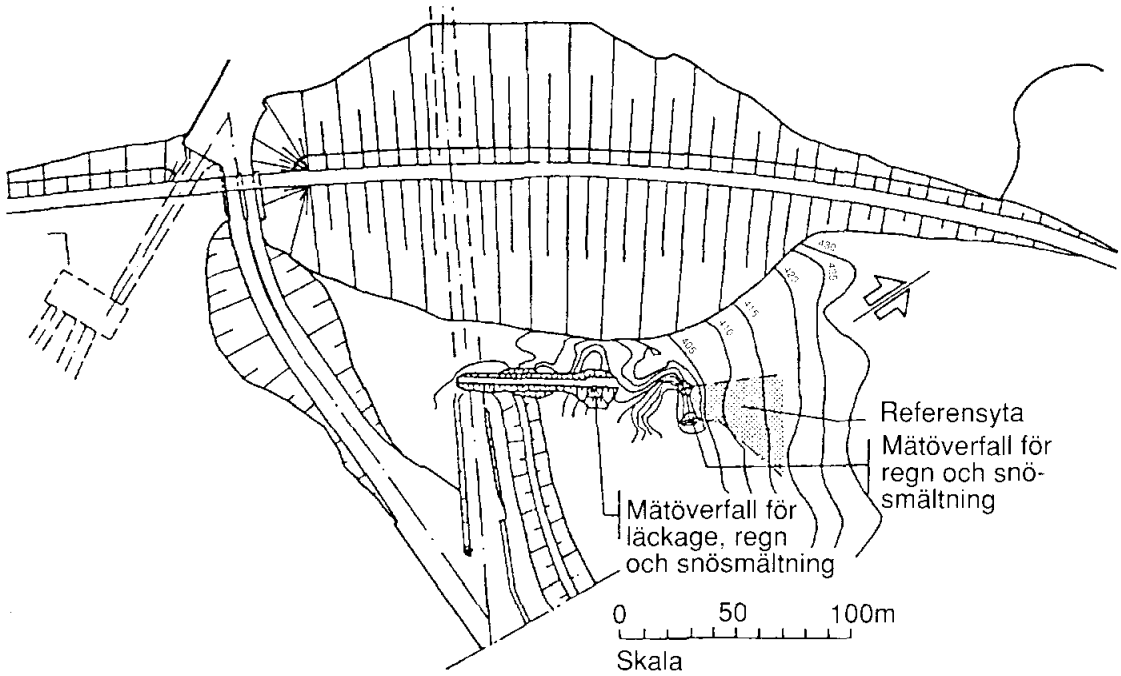
Figur 3.1. Triangulärt mätöverfall i kanal.



1. Mätöverfall 2. Uppsamlande vall 3. Nedströmstå för huvuddamm

Figur 3.2. Mätöverfall lokaliserat fristående från huvuddammen.

Den första möjligheten med jämförelse mellan olika mätområden med flödesmätning tillämpas vid installationerna vid Vattenfalls dammar i Stenkullafors och Suorva. Den andra möjligheten med referensområde tillämpas vid Vattenfalls damm i Ajaure, se figur 3.3.



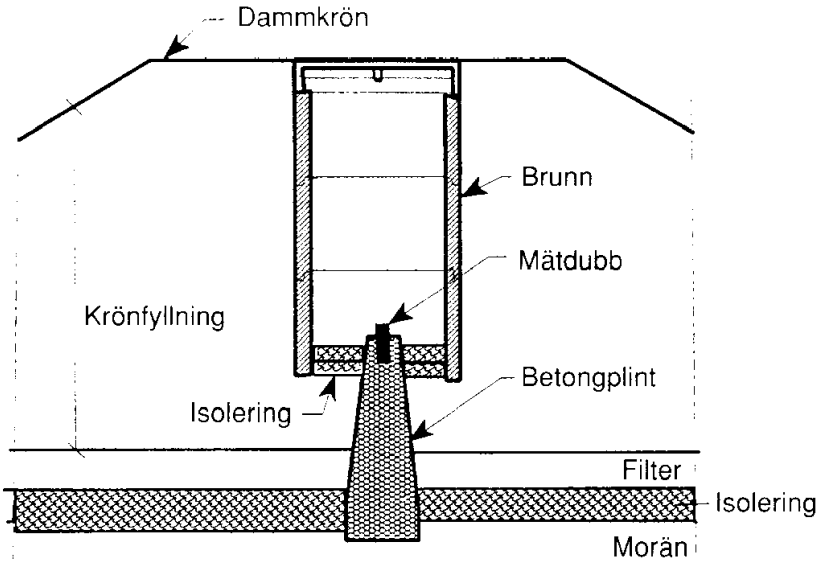
Figur 3.3. Läckagemätning med referensområde för att kunna ta hänsyn till nederbörd och snösmältning.

3.2.3. Deformationsmätningar på dammens krön och slänter

Basinstrumenteringen för långtidsövervakning av fyllningsdammar innefattar normalt referenspunkter placerade längs dammkrönet och nedströmsslänten för mätning av vertikala och horisontella rörelser. Sättningsmätningen utförs vanligen med avvägningsinstrument, som beroende på kravet på noggrannhet, finns av olika typer. Inmätning i planläge görs genom geodetisk triangulering (vinkelmätningar med teodolit) eller med elektroniska instrument för avståndsmätning (geodimetrar).

Längs dammkrönet anordnas plintar som grundläggs på tätkärnans överkant. På plintens topp fastgjuts en mätdubb, som vid inmätning kan nås från dammkrönet genom en brunn, se figur 3.4. För att undvika att plinten påverkas av tjäle isoleras dammens tätkärna i närheten av brunnen. Avståndet mellan mätpunkterna väljs ofta till 50 à 100 m, dock anordnas normalt minst tre brunnar längs varje damm.

I dammslänten gjuts mätdubbarna in på motsvarande sätt i plintar, som dock görs lägre och grundläggs på ca 0,5 m djup under slänten. Där stödfyllningen består av sprängsten kan mätdubbarna sättas fast i större block.



Figur 3.4. Mätdubb i tätkärnans krön.

3.2.4. Vattenståndsrör och portrycksmätare

Mätning av grundvattenytan i marklagren i närheten av dammtån ingår normalt i basinstrumenteringen för dammar där nedströms stödfyllning grundlagts på jord. Främst är det här av intresse att få indikation på eventuella trender till ökande tryck, som kan uppstå om läckningen ökar i undergrunden. Där tätkärnan grundlagts på berg kan läckningen öka t ex på grund av att injekteringsskärmen försämras med tiden. Där även tätkärnan grundlagts på jord kan läckningen öka genom förändrade läckvägar på grund av inre erosion i naturliga jordlagren.

Då långsamma förändringar i första hand är av intresse kan mätningen ofta göras med öppna vattenståndsrör. Dessa kan bestå av galvaniserade standardrör med minst ca 35 mm diameter. Nedersta 0,5 á 1,0 m av rören förses med hål och fylls efter nedsättningen med grovsand eller sandigt grus. Om rören slås ned pluggas nederänden för att förhindra inträngning av jord vid installationen. På marknaden finns alternativt ett flertal typer av färdiga filterspetsar som kan vara praktiska att använda.

Vattennivån i vattenståndsrör mäts vanligen manuellt med "klucklod" eller med en ledare som förs ned i röret och ger signal när änden når vattenytan. Rören kan även förses med instrument för automatisk registrering av vattennivån.

Vid fyllningsdammar med central tätkärna kan eventuellt läckage genom dammen eller minskad effektivitet hos dränagesystem under nedströms stödfyllning indikeras genom att mäta vattenståndet i filterzonen nedströms kärnan. Mätningen kan göras i öppna vattenståndsrör, som installeras med spetsen i filtrets djupaste del. Installationen utförs vanligen efter det att dammen byggts färdig, för att undvika störningar under byggnadstiden.

För att kontrollera portryck i tätkärnan under byggnadstiden eller bekräfta förväntat portryck i kärnan i samband med första dämningen installeras ofta portrycksgivare i tätkärnan. Dessa givare kan även användas för kompletterande mätningar vid långtidsövervakning. Indikation kan härigenom fås på eventuellt förhöjt portryck på grund av läckage. Portrycksmätare med slutna system brukar installeras eftersom tätjorden är

finkornig och relativt snabba förlopp önskas kunna registreras under byggnadstiden eller i samband med förändringar av magasinet. I marknaden finns en rad olika typer av portrycksmätare där avläsning av trycket på ett membran görs t ex med vibrerande sträng, trådtöjningsgivare eller pneumatik. Vidare finns hydrauliska portrycksmätare av olika fabrikat. För och nackdelar hos olika typer av mätare finns i detalj behandlade av Sherard /12/.

Portrycksmätare med slutet system kan levereras med olika typer av keramiska filter. När installation skall göras i delvis vattenmättad jord eller där t ex avsänkning av magasinet senare kan medföra att portrycket försvinner och eventuellt blir negativt är det fördelaktigt att välja en filtersten som har liten pordiameter och låg permeabilitet. Härigenom får stenen hög kapillär stighöjd som förhindrar att luft tränger in i filterstenen efter det att den vattenmättats. En portrycksmätare som är fullt vattenmättad reagerar snabbare än en mätare som delvis innehåller luft. Motståndet mot luftinträngning anges vanligen som "bubbeltryck" som motsvarar kapillär dragförmågan hos filterstenen. Finkorniga keramiska filter har ett bubbeltryck av i storleksordningen 100 till 200 kPa. Trenden är att tillverkarna marknadsför portrycksmätare med allt finkornigare filter.

3.3. Kompletterande instrumentering

3.3.1. Allmänt

Den normalt mer omfattade mätningen av instrument under första dämningen och åren närmast därefter kan som ovan nämnts oftast successivt minskas båda beträffande antal mätpunkter och frekvens.

Trender i mätresultaten liksom främst dammens komplexitet kan dock ge anledning att fortsätta mätningar av en mer omfattande instrumentering även för långtidsövervakning än vad som ovan beskrivits som basinstrumentering.

För dammar som grundläggs på jord långtidsövervakas ofta grundvattentrycken i marklagren i närheten av dammtån. Portrycket kan här mätas med öppna rör om jorden är permeabel, medan portrycksmätare med slutet system används vid täta jordar (t ex lera).

Då konsekvenserna för dammbrott är stora eller då dammhöjden är högre än 30 m bör enligt Ref /3/ kompletterande av instrumenteringen med meteorologiska observationer och eventuellt med mätning av deformationer och portryck i dammkroppen. Vidare kan vid dessa dammar övervägas installation av kontinuerlig övervakning av vissa parametrar t ex läckage och rörelser som förses med larm till driftcentral vid förbestämda gränsvärden.

I föreliggande rapport ges som ovan nämnts endast exempel på "kompletterande instrumentering". På marknaden finns en mängd olika instrument som används för olika ändamål vid övervakning av fyllningsdammar. Som ytterligare exempel kan nämnas extensiometrar, jordtrycksdosor och olika system för dammbrottsvarning. Det ligger dock utanför målet med denna översiktliga rapport att beskriva dessa instrument. För ytterligare information hänvisas till /6/ och där listade ytterligare referenser.

3.3.2. Automatisering

Minskningen av personal vid dammanläggningarna, i kombination med snabb teknisk utveckling inom elektroniken, har som ovan nämnts lett till att automatisering av damminstrumenteringen blivit allt mer aktuell. Vanligast har hittills varit automatisering av läckagemätning. Målet har oftast varit att kontinuerligt mäta läckaget och kunna avläsa läckagemängden både vid närliggande kraftstation och vid en driftcentral på stort avstånd från anläggningen. Vidare har önskemål funnits att kunna lägga in en nivå för larm till driftcentralen. Ett schema på automatisering av läckagemätning vid en damm framgår av figur 3.5. Vid denna anläggning finns även automatisk avläsning av läckaget för ett referensområde (se figur 3.3 ovan), liksom automatisk mätning av regn och lufttemperatur.

3.3.3. Automatisk deformationsmätning

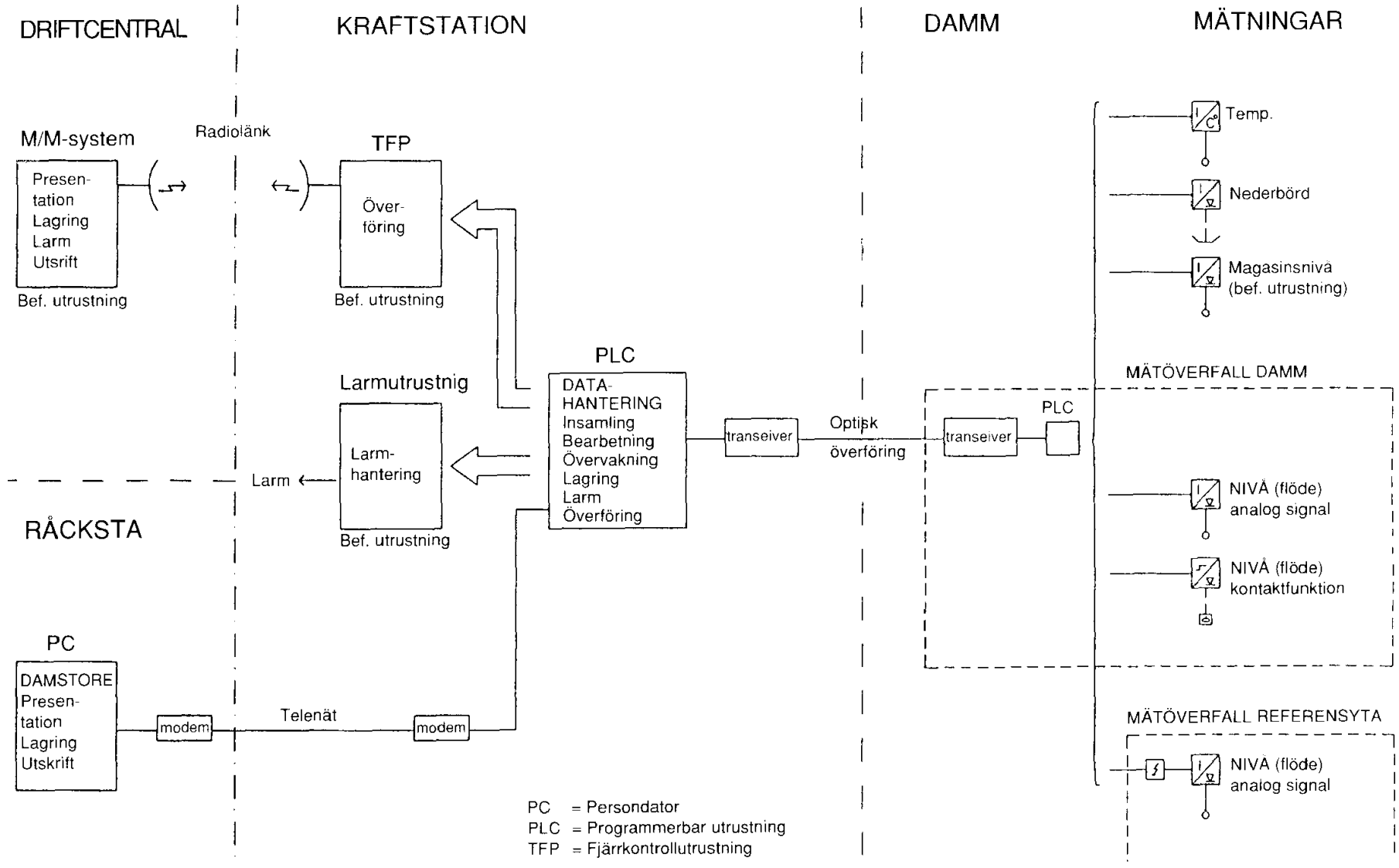
Inklinometer där horisontalrörelsen i jorden mäts på olika nivåer med automatisk avläsning finns installerad i Vattenfalls damm i Ajaure. Installationen beskrivs här som ett exempel på kompletterande instrumentering installerad för att kontinuerligt kunna övervaka dammens rörelser, som genom årlig mätning av kröndubbar konstaterats vara onormalt stora och fortgående även lång tid efter dammens färdigställning. Detta har lett till en förstärkning av dammen.

Systemet, som utvecklats av Statens Geotekniska Institut i Linköping, består av fasta inklinometrar på 1,0 m avstånd som kopplats samman så att mätning i detta fall kan göras ned till 20 m djup under dammkrönet. Inklinometerröret är installerat från dammkrönet och vertikalt ned i nedströmsfiltret. Resultat från mätningarna visas i figur 3.6, där varje kurva representerar en viss nivå under krönet och visar horisontalrörelsens variation med tiden. Vidare framgår i samma figur vattenståndet i magasinet, som sänks av under senvintern och höjs igen i samband med vårfloden. De stora rörelserna uppmätta i början av mätperioden har bedömts vara påverkade av rörets installation. Därefter har fortgående rörelser uppmätts, som avstannat under mätperiodens senaste del då magasinet varit avsänkt ett par meter och en motfyllning byggts vid dammtån. Resultatet visar att i detta fall kan variationer av ett par millimeter i horisontalrörelsen registreras.

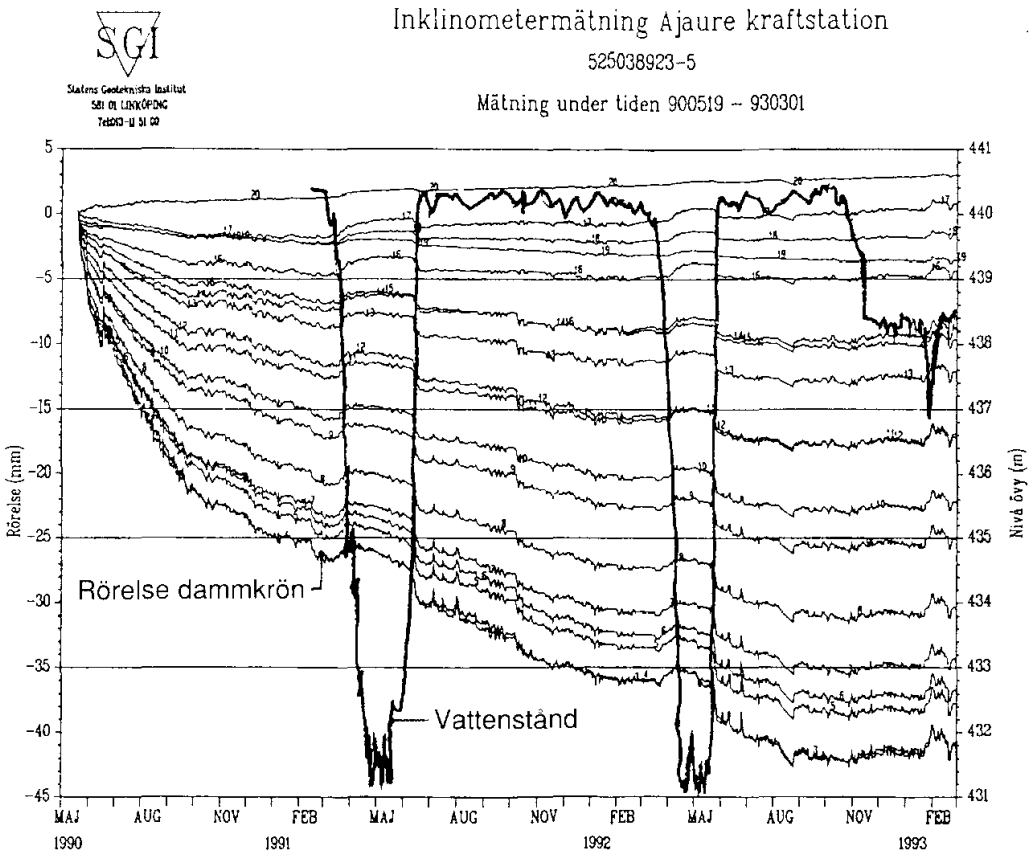
Mätningen är automatiserad och larmnivåer finns dels för totalrörelsen av krönet, dels maximal vinkeländring på någon av mätnivåerna. Överföring av mätdata görs i princip kontinuerligt till driftcentral via tidigare etablerade signalsystem och till ytterligare en avlägsen valfri plats via telenätet. Övervakningssystemet finns allmänt beskrivet i referens /13/.

3.4. Rutiner för utvärdering av mätdata

Instrumentering, datainsamling, bearbetning och redovisning av mätdata ingår som en del av dammägarens rutiner för övervakning av fyllningsdammar. Beroende på arbetets omfattning och antal personer inblandade finns etablerade rutiner. Bearbetning och tolkning av resultat från mätningarna kan vara lämplig att utföra i samband med den årliga inspektionen eller besiktningen. Redovisning och tolkning av resultaten inarbetas i sådant fall i rapporten från besiktningen. Gränsvärden kan etableras för känsliga mätningar, för att eventuella förändringar mellan inspektionstillfällena lätt skall observeras.



Figur 3.5. Exempel på automatisering av läckagemätning vid en fyllningsdamm.



Figur 3.6. Resultat från horisontalrörelsemätningar i Ajauredammen.

4. VARIATIONER I UNDERSÖKNINGSPARAMETRAR

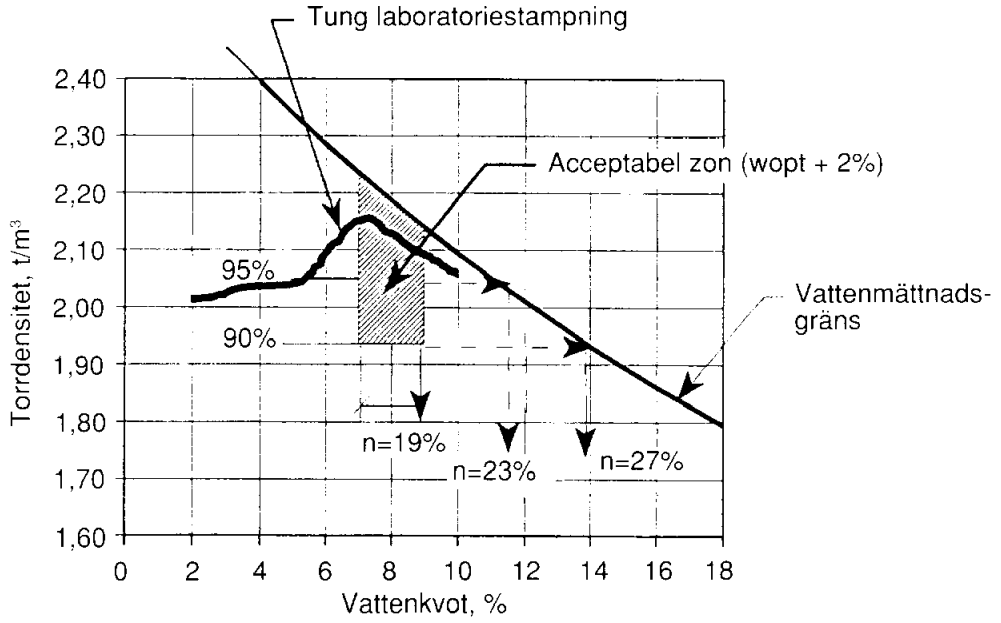
4.1. Allmänt

För en fyllningsdamm är inre erosion den vanligaste och allvarligaste förändringen ur dammsäkerhetssynpunkt, jämför /14/. Vid inre erosion i t ex dammens tätkärna förflyttas finmaterialet i tätjorden, som oftast består av morän. Finmaterialet följer vattenströmningen som sker genom kärnan. Inre erosionen leder till att materialets hålvolym, dvs porositet, ökar. Erosionen leder också ofta till andra förändringar, t ex ökning av vattentrycken, förhöjd vattengenomsläpplighet och spänningsförändringar i jorden.

Vid val av undersökningsmetod för att detektera eller klarlägga omfattningen av ett område i tätkärnan som skadats av inre erosion behövs kännedom dels om normala variationer i parametrarna som skall undersökas, dels undersökningsmetodens noggrannhet.

4.2. Variationer i densitet och porositet

En uppfattning om normala variationen av porositeten hos moränen i tätkärnan kan fås från kraven som finns på materialets packningsgrad i samband med byggandet. Normalt eftersträvas då en packningsgrad som överstiger 95% av tung laboratoriestampning, men enstaka packningsresultat ned till 90% kan accepteras. Detta innebär som ett exempel, att för en morän med maximala torrdensiteten 2,15 ton/m^3 skall normalt densiteten vara högre än 2,04 ton/m^3, men enstaka värden ned till 1,93 ton/m^3 får förekomma. Vid en kompaktdensitet av 2,65 ton/m^3 kommer härigenom porositeten att normalt vara i intervallet 19-23%, men enstaka toppvärden på 27% kan förekomma. Specifikationer för byggandet tillåter således att porositeten i tätkärnan varierar med maximalt ca 8%, jämför figur 4.1.



Figur 4.1. Tillåtna variationer i tätjordens torrdensitet i samband med byggandet.

Undersökningar av en tätkärna där materialet skadats på grund av inre erosion har bl a gjorts vid Stenkullaforsdammen, jämför /15/ och /16/. Vattenkvoten hos prover, som togs upp

med kolvprovtagare med 100 mm diameter, varierade här mellan 5% i mycket hårda lager, till 18 % i mycket lösa lager. Då materialet var vattenmättat kan torrdensiteten härigenom beräknas variera mellan 1,80 och 2,35 ton/m^3. Detta betyder att porositeten i materialet varierade mellan 11 och 31%. Vid jämförelse med tillåtna variationer i samband med byggandet kan detta tolkas som att vissa lager har packats markant, troligen på grund av höga spänningar genom valvbildning, medan de lösa lagren däremellan har fått i storleksordningen 4% högre porositet än vad som tillåts i samband med byggandet. I genomsnitt har porositeten för de lösa lagren ökat med 8%, om de ursprungligen varit packade till 95% packningsgrad.

4.3 Variationer i vattengenomsläpplighet

I samband med byggandet finns ofta krav på tätjordens största vattengenomsläpplighet (hydraulisk konduktivitet). Ofta föreskrivs att konduktiviteten skall vara mindre än 1 x10^{-7} m/s, då jorden packas på laboratorium till en packningsgrad i närheten av tung laboratorie-stampning. Oftast kan detta krav på största vattengenomsläpplighet uppfyllas med morän som har en finmaterialhalt (<0,06 mm) av minst 15%, räknat på mängden material mindre än 20 mm. På grund av moränens variation i kornfördelning brukar erfarenhetsmässigt konduktiviteten vid laboratorieprovningen variera i intervallet 3 x10^{-7} m/s till 3 x10^{-9} m/s. I fält kan variationen förväntas vara något större på grund av olika packningsgrad i lagrens över- och underkant. Vidare finns i samband med utläggningen en viss tendens till separation där moränens grövre partiklar samlas i lagrets undre del, vilket också kan förväntas öka naturliga spridningen i tätkärnans konduktivitet.

En uppfattning om hur mycket en påbörjad inre erosion förhöjer vattengenomsläppligheten kan fås från ovan refererade undersökningar av dammen i Stenkullafors. Om de lösa lagren där ökat sin porositet med 8% på grund av borttransport av finmaterialet kan från en kornfördelningskurva för en typisk morän uppskattas att D10 ökat till i storleksordning 0,05 mm. Konduktiviteten för ett sådant material kan uppskattas till ca 1 x 10^{-5} m/s, vilket motsvarar en höjning av vattengenomsläppligheten med i storleksordningen 100 à 1 000 gånger i förhållande till normala värden i samband med byggandet. I det aktuella fallet har därför dammen förstärkts med en stödbank på nedströmssidan för att kunna tåla tänkbara läckage.

4.4. Förändringar i vattentryck

När inre erosion inträffar i en tätkärna av morän, där nedströmssidan är skyddad av ett väl fungerande filter, sker ansamling av finmaterialet i kontakten mellan tätkärna och filter. Trycket från uppströmsvattenytan kommer härigenom att fortplantas långt in i tätkärnan och vattentryck i nivå med magasinet kan mätas upp i tätkärnans nedströmskant.

Naturliga vattentryck i tätkärnan kan uppskattas med hjälp av strömnät. På grund av ovan nämnda naturliga variation i materialets konduktivitet, som dessutom på grund av den lagervisa uppbyggnaden kan förväntas vara högre horisontellt i jämförelse med vertikalt, blir uppskattningen dock grov. Det kan därför vara svårt att särskilja förhöjda tryck på grund av inre erosion från naturliga tryck som kan uppstå i en normalt fungerande tätkärna. Mätningar av vattentrycken i en tätkärna kan dock vara väl befogade, eftersom förändringar i trycken med tiden kan registreras, vilka kan tyda på att inre erosion pågår i tätmaterialet.

5. UNDERSÖKNINGSMETODER

5.1. Allmänt

När man i den planmässiga kontrollen, som skisserats ovan, upptäcker en förändring som kan vara ett dammsäkerhetsproblem kan fältundersökningar behövas för att utreda skadans omfattning och för att ge underlag för projektering av eventuella förstärkningsåtgärder.

Erfarenheter visar att förändringar som enkelt kan upptäckas genom direkta observationer (t ex skador på erosionsskydd) utgör en stor andel av antalet rapporterade förändringar. Det finns dock förändringar som är svåra att upptäcka (t ex inre erosion vid övergången mellan fyllningsdamm och betongkonstruktioner) som kan markant påverka dammens säkerhet. Det kan därför finnas anledning att undersöka dammar med fältmetoder även i de fall där förändringar inte upptäckts vid den planmässiga kontrollen. Undersökningen kan i dessa fall riktas in på att i ett tidigt skede upptäcka förändringar, som erfarenhetsmässigt kan vara aktuella för dammtypen.

Det finns en mängd olika geotekniska metoder för grundundersökning och normalt används en kombination av metoder för att täcka de variationer i egenskaper som förekommer i materialen som skall undersökas. Vid val av metoder och vid genomförandet av undersökningen behöver säkerheten för dammen särskilt uppmärksammas, eftersom själva undersökningen i form av håltagning och eventuell spolning vid genomförandet av t ex en borrning skulle kunna medföra skador som försämrar säkerheten. Allmänt bör ställas krav på personer som planerar och övervakar fältundersökningar av dammar, att de förutom kunskaper om undersökningsmetoden, har god kännedom om fyllningsdammars funktion och de restriktioner som kan behövas för arbetet för att undvika att dammen skadas.

I det följande beskrivs översiktligt de vanligaste geotekniska metoderna: provgropsgrävning, sondering och borrning, som kan vara aktuella vid undersökning av misstänkta skador på en damm. Vidare nämns några möjligheter till fältförsök som kan genomföras i borrhål och exempel på laboratorieundersökningar som kan göras på upptagna jordprover.

5.2. Provgropsgrävning

Grunda provgropar och ytlig provtagning kan göras för hand, men vid större omfattning används oftast grävmaskin. Vanligen begränsas provgropars djup till ca 4 m och slänterna görs tillräckligt flacka för att undvika plötsliga ras, som kan skada personal som skall arbeta i gropen för att genomföra kartering och provtagning av materialet i schaktslänterna.

Provgropar ger möjlighet att visuellt i detalj undersöka genomschaktade jordlager t ex i dammkrönet eller i nedströmsslänten. Egenskaperna hos lagren kan bedömas och prover kan tas för vidare undersökning på laboratorium. Gropar kan också användas till att undersöka konditionen hos konstruktionsdetaljer, som sponter intill utskov eller tätningar i form av t ex betongskärmar i dammens centrala delar. I en damms tätkärna av morän kan schaktningen av en provgrop endast göras till ett djup marginellt under vattenståndet uppströms dammen, innan jordflytning och uppluckring inträffar i gropen. Om djupare undersökning behövs bör övergång göras till andra metoder.

Redovisningen av en provgropsundersökning bör, förutom plan och sektion av gropen, omfatta en detaljerad beskrivning av jordlagren. Resultat bifogas från fältförsök, t ex densitetstester och försök med handpenetrometer. Vidare ges uppgifter om gjorda provtagningar. Redovisningen bör alltid kompletteras med färgfotografier. Provgropar rekommenderas bli återfyllda så snart som möjligt efter det att kartering, provtagning och testningar genomförts, eftersom öppna gropar kan vara en säkerhetsrisk. Krav på återfyllningen i form av materialtyp och packning bör fastställas innan schaktningen påbörjas.

5.3. Sondering

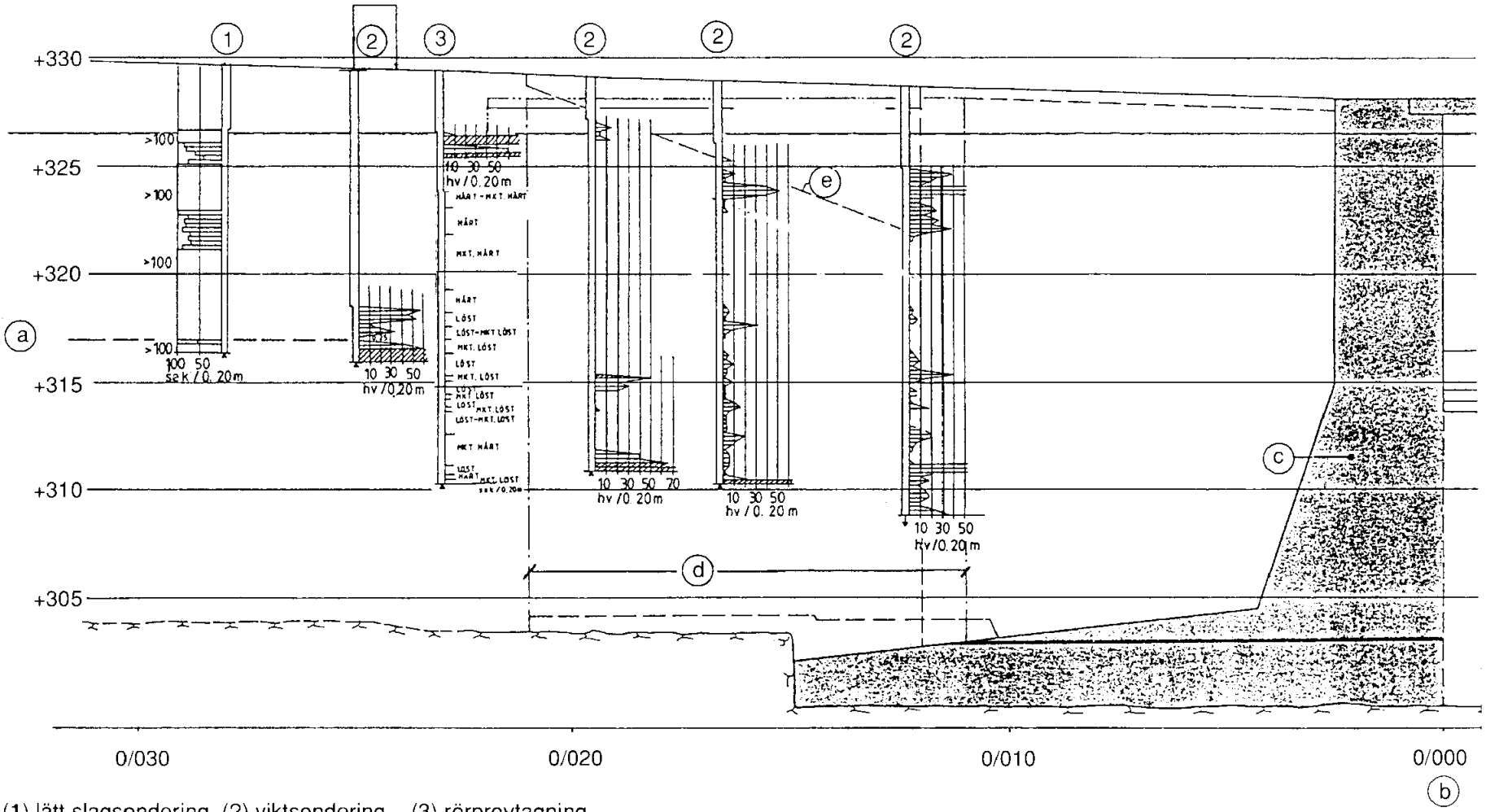
5.3.1. Allmänt

Genom sondering kan en tätkärnas fasthet bestämmas antingen kontinuerligt med djupet, eller på vissa nivåer genom sondering i botten av nedborrade foderrör. Det finns ett flertal sonderingsmetoder, där viktsondering, spetskraftsondering och hejarsondering är de i Sverige mest använda. Sonderingar görs inom geotekniken vanligen i lera och friktionsmaterial, som har litet innehåll av block vilka kan medföra stopp för sonderingen.
I praktiken har det dock visat sig att sondering i många fall kan göras till stora djup i en damms tätkärna av morän, särskilt i partier som skadats av inre erosion där jorden kan vara mycket lös. I det följande beskrivs sonderingsmetoderna i korthet och ges exempel på fall där resultat från sondering givit en god bild av skadade partiers utbredning. Då sondering inte erfordrar någon spolning och hålet har liten diameter som faller ihop när sonden dras tillbaka, bedöms påverkan på tätkärnan bli marginell och oftast ha försumbar inverkan på dammens funktion.

5.3.2. Viktsondering och lätt slagsondering

Viktsonden består av en skruvformad spets, stänger och vridmaskin. Erforderlig nedtryckningskraft mäts i regel med inbyggd dynamometer. Viktsonden används som en statisk sond i lös jord när sonderingsmotståndet är mindre än 1 kN (100 kg). När motståndet överskrider 1 kN vrids sonden och antal halvvarv noteras för varje 0,2 m sjunkning av sonden. För att minska den mantelfriktion som kan uppstå i samband med sondering genom fastare ytskikt utförs förborrning, som syftar till att ge en riktigare bild av underliggande lösare jordlagers fasthet. Då viktsonden inte kan drivas ned ytterligare med hjälp av vridning kan sonden drivas ytterligare genom slagborrmaskin (typ Cobra, Wacker etc). Metoden kallas då lätt slagsondering och resultatet anges i sekunder som behövs för varje 0,2 m sjunkning av sonden. Viktsondering och lätt slagsondering (utrustning, genomförande, registrering och redovisning) är standardiserad av Svenska Geotekniska Föreningen (1976).

I Stenkullaforsdammen utfördes 1988 bl a omfattande sonderingar, jämför /15/ och /16/. Undersökningarna gjordes främst i tätkärnan i närheten av dammarnas anslutning till utskov och intag. Några undersökningspunkter placerades också på längre avstånd från anslutande betongkonstruktioner. Sonderingarna visade att tätjorden allmänt var mycket löst lagrad i närheten av dessa konstruktioner. I en av sonderingspunkterna sjönk sonden vid 1 kN belastning mestadels utan vridning ned till 20,4 m djup under krönet. I området mellan fyllningar byggda under olika år var det mycket löst, vilket indikerades genom frisjunkning



(1) lätt slagsondering, (2) viktsondering, (3) rörprovtagning,
(a) nivå för vinteruppehåll under byggnadstiden, (b) längdmätning,
(c) utskovspelare, (d) stålspont i tätkärnans mitt, (e) vingmur

Figur 5.1. Resultat från sondering i tätkärnan i vänster damm intill utskov.

med 0,25 kN vid viktsonderingen i ett hål där förborrning utförts. På stort avstånd från konstruktionerna var tätjorden så fast att viktsondering inte kunde utföras utan sonderingen fortsatte med hjälp av lätt slagsondering. I figur 5.1 visas som ett exempel resultaten från sonderingar i tätkärnan i en längdprofil av vänster damm intill en utskovspelare.

En indikation av viktsonderingens upplösning kan fås från ovanstående exempel där skadans utbredning kunnat avgränsas med hjälp av sonderingen. Från avsnitt 4.2 ovan framgår att moränen, som är mycket lös och har skador från inre erosion, har fått i storleksordningen 4% högre porositet än vad som tillåts i samband med byggandet. Vidare har porositeten av de lösa lagren ökat med ca 8% i förhållande till genomsnittliga värden från byggandet. Exemplet visar härigenom att viktsondering i detta fall kunde registrera skillnader på ±4% i porositet. För ytterligare information om utvärdering i allmänhet hänvisas till /17/.

5.3.3. Spetskraftsondering

Vid spetskraftsondering pressas en spetstrycksond med en bestämd hastighet ned i jorden, samtidigt som kraften registreras kontinuerligt vid spetsen. Eventuellt registreras även friktionsmotståndet längs en friktionshylsa placerad intill spetsen. Spetsarna har under senaste åren utvecklats till att även kontinuerligt kunna mäta portrycket vid spetsen då sonden pressas ner i jorden. Denna metod finns även standardiserad av Svenska Geotekniska Föreningen.

Det är inte känt om spetskraftsondering använts hittills i Sverige vid undersökning av tätkärnor i fyllningsdammar. Anledningen till den begränsade användningen är att spetsarna är dyra och att det finns risk att de kan skadas då block påträffas.

Utomlands har dock utvecklats utrustningar för spetskraftsondering som är mer robusta för användning till sondering i fasta moräner, se /18/. Förutom den förstärkta spetsen förutsätter metoden förborrning i steg om 1,5 m. Resultaten erhålls som en kontinuerlig registrering av spetsmotståndet med djupet, vilken har funnits väl överensstämma med resultat från ovan standardiserade utrustning.

5.3.4. Hejarsondering

Hejarsondering är en dynamisk sondering där man på samma sätt som vid viktsondering erhåller ett kontinuerligt diagram över motståndet på olika nivåer. Den främsta användningen av dynamisk sondering är där vikt- eller spetskraftsondering är svåra att utföra. Vid hejarsondering mäts antal slag som erfordras för 0,2 m sjunkning. Hejare har vikten 63,5 kg och får falla fritt 0,5 m på en slagdyna som är fäst vid sonderingsstängerna. Denna metod är standardiserad i två olika utföranden av Svenska Geotekniska Föreningen.

5.4. Borrning och undersökningar i borrhål

5.4.1. Allmänt

Rotationsborrning där borrkronan eller foderröret roterar i botten av borrhålet är den vanligaste metoden för att få ett vertikalt hål i tätkärnan. Hålet ger möjlighet till provtagning eller andra undersökningsmetoder. Spolningen pumpas eller blåses ner till borrkronan genom ihåliga borrstänger, vilket smörjer borrkronan och spolar borrkaxet upp i hålet. Spolningen görs vanligen med vatten eller luft, men borrvätska som innehåller bentonit eller skum kan medföra fördelar, se nedan.

Det finns två principer för rotationsborrning dels borrning med öppet hål, där borrkronan skär allt material inom diametern för hålet, dels kärnborrning där borrkronan är fäst vid en yttre roterande tub av provtagaren och skär en kärna i jorden. Kärnan bibehålls i en inre stillastående tub i provtagaren, som tas upp till markytan för undersökning. Foderrör används normalt för att stabilisera borrhålet och för att skära av öppna sprickor, som kan orsaka förlust av spolningen och skador i omgivande jord.

Kärnborrning som undersökningsmetod har fördelen i förhållande till rotationsborrning i öppet hål, att metoden ger en kontinuerlig provtagning allteftersom hålet förs mot djupet. Borrkaxet från borrning i fullt hål kan endast ge en indikation på jorden som genomborras. Rotationsborrning är dock användbar för att snabbt göra ett hål till visst djup där provning kan utföras eller ett instrument installeras. Jordprover kan också tas upp med provtagare genom foderrör som förts ned till viss nivå med rotationsborrning.

I det följande beskrivs risken för skador i tätkärnan i samband med borrningen och några vanligen använda utrustningar för rotationsborrning. Vidare beskrivs några typer av undersökningar och installationer av instrument som kan göras i borrhål.

5.4.2. Skaderisker i samband med borrning

I samband med borrning i en tätkärna kan helt eller delvis bortfall av återspolningen inträffa, vilket indikerar att spolmedlet försvunnit ut genom sprickor eller andra kanaler i jorden som omger borrkronan. Undersökningar som gjorts för att utreda orsaken till bortfallet av återspolningen till markytan visar ofta inga skador i dammen och inga problem har uppstått när dammen senare tagits i drift med full dämning. En beskrivning av skaderiskerna med praktikfall finns gjord av J.L. Sherard i referens /19/. I artikeln konstateras att det finns tillräckligt med erfarenhet för att dra slutsatsen att bortfall av återspolningen är vanliga och kan inträffa i väl byggda dammar, i vilka det inte fanns några öppna sprickor innan borrningen utfördes. I dessa fall försvann spolmedlet i någon spricka, som öppnats på grund av vätsketrycket. Sprickan kan vara en ny spricka eller en befintlig men sluten spricka. Uttrycket hydraulisk uppspräckning är tillämpbart i båda fallen. I samband med injektering används avsiktligt ibland höga tryck för att på samma sätt tvinga in injekteringsmedel i sprickor, som öppnar sig på grund av trycket.

Undersökningar visar att i nästan alla dammar kan man räkna med att det finns sprickanvisningar sedan byggnadstiden, t ex i kontakten mellan olika lager som utgör en inbyggd svaghet trots att det gamla lagret ofta rivs upp i ytan innan nytt lager sprids. I dessa svaga lager kan hydraulisk uppspräckning inträffa i samband med borrning i de fall då spoltrycket

överstiger totaltrycket som finns i sprickplanet på grund av jordens överlagringstryck. Tätkärnor som är tunna och centralt belägna i dammkroppen har visat sig vara känsliga för uppspräckning, eftersom jordtrycken i dessa kärnor ofta är låga på grund av valvbildning mellan uppströms och nedströms filterzoner som är styvare än den mellanliggande tätkärnan.

Om vätskeflödet ut från ett borrhål är stort och långvarigt bildas erosionskanaler. Om återspolningen försvinner bör därför borrningen omedelbart stoppas och alternativa undersökningsförfaranden övervägas. Hydraulisk uppspräckning kan av flera orsaker inträffa mycket lättare i samband med borrning än av vattentrycket vid fullt magasin. Den viktigaste orsaken härtill är kanske att trycken vid borrningen oftast är betydligt högre än vattentrycket från magasinet.

Följande slutsatser kan dras av ovanstående beskrivning av förlust av återspolningen i samband med borrningen:

- Det går inte att avgöra från förlust av återspolningen om vattentrycken i magasinet kan orsaka hydraulisk uppspräckning i kärnan.

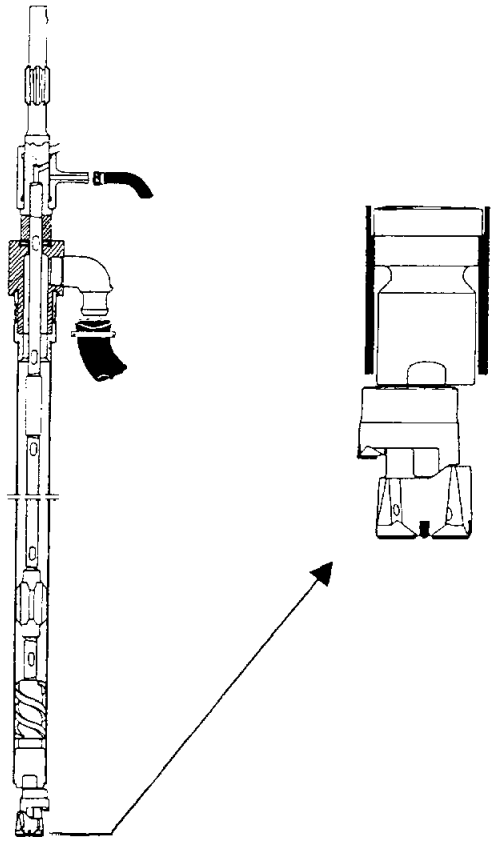
- Vid borrning med vatten under högt tryck riskeras att spolningen kan medföra inre erosion i tätkärnan och orsaka ett dammsäkerhetsproblem som inte tidigare fanns.

För att minska ovan nämnda risk för skador undviks normalt vatten som spolmedel vid undersökningsborrning i tätkärnor. Luftspolning minskar erfarenhetsmässigt skaderisken, men eftersom luftspolning är mindre effektiv att lyfta upp borrkaxet till markytan blir möjligt borrdjup begränsat. Spolning med en blandning av luft, vatten och skum är en metod som medför mindre risk än vattenspolning. Vid denna teknik tillsätts ofta även en polymer då borrningen görs under grundvattennivån. I jämförelse med ren luft har skummet större förmåga att hålla kaxet i suspension och den låga hastigheten av skummet i hålet i kombination med den lilla mängd vatten som behövs medför att störningen i jorden runt borrkronan blir liten. Den stabiliserande polymeren har dock nackdelen att belägga borrhålets väggar, vilket gör att permeabilitetstester utförda i hålet inte blir representativa för omgivande jordens vattengenomsläpplighet.

5.4.3. Utrustningar för rotationsborrning

Den vanligaste metoden för rotationsborrning i Sverige är någon form av ODEX-borrning, varför den beskrivs i det följande. Utomlands däremot är kärnborrning betydligt vanligare. Olika typer av kärnborrutrustningar finns beskrivna t ex i referens /20/.

Vanligaste diametern på foderröret vid ODEX-borrning är 75 mm eller 112 mm. Utrustningen är gjord för borrning i jord som innehåller block och består av ett yttre foderrör och ett inre system med stänger, som borras ned med en excentrisk borrkrona, som vid ovan nämnda diametrar på foderröret gör ett hål med diametern 96 respektive 152 mm. Foderröret roterar inte vid borrningen utan följer borrkronan av sin egen vikt eller trycks ner med innerstängerna. Utrustningen framgår schematiskt av figur 5.1.



Figur 5.1. ODEX-utrustning (Atlas Copco 3" ODEX).

Vid borrning med ODEX-112 mm foderrör är det lämpligt att använda följande typer av borrmaskiner för neddrivningen: Atlas Copco ROC 601, Aquadrill 441/461 eller mobila utrustningar typ B30 och B40, som också kan utrustas med tillbehör för skumspolning.

5.4.4. Undersökningar i borrhål

Den vanligaste undersökningsmetoden i samband med borrning i en tätkärna är upptagning av jordprover. Provtagningen kan vara av följande typer:

- störda prover upptagna med t ex gruskannprovtagare
- delvis störda prover upptagna med rörprovtagare, som har en vass egg i undre kanten och som trycks eller slås ned under nivån för foderrörets underkant
- kärnborrprovtagare som har en skärande egg i underkant och som roteras ned

Upptagna prover granskas okulärt och kan undersökas på laboratorium t ex med avseende på vattenkvot, kornfördelning och vattengenomsläpplighet.

I botten av ett foderrör kan också utföras infiltrationsförsök för att bestämma jordens vattengenomsläpplighet. Försöket kan antingen göras med konstant tryckhöjd där tillförd vattenmängd mäts, eller med fallande tryckhöjd där hastigheten för vattenytans sjunkning mäts i foderröret. Innan försöket påbörjas behöver yttre vattentrycket vid foderrörets botten bestämmas genom att vattenståndet i röret mäts när det stabiliserat sig. Under försöket

behöver vattentrycket utöver den stabiliserande nivån hållas låg för att undvika hydraulisk uppspräckning som beskrivits ovan i avsnitt 5.4.2. I de flesta fall bör det pådrivande vattentrycket begränsas till några få meters vattenpelare. Testen kan i sin enklaste form göras genom ändytan av foderröret, där eventuellt sedimenterat material behöver rensas bort innan försöket påbörjas. Noggranheten kan förbättras om filtermaterial fylls i nedre delen av foderröret, varefter röret dras upp en bestämd längd, så att infiltrationsytan mot omgivande jord ökar i förhållande till enbart infiltration genom ändytan.

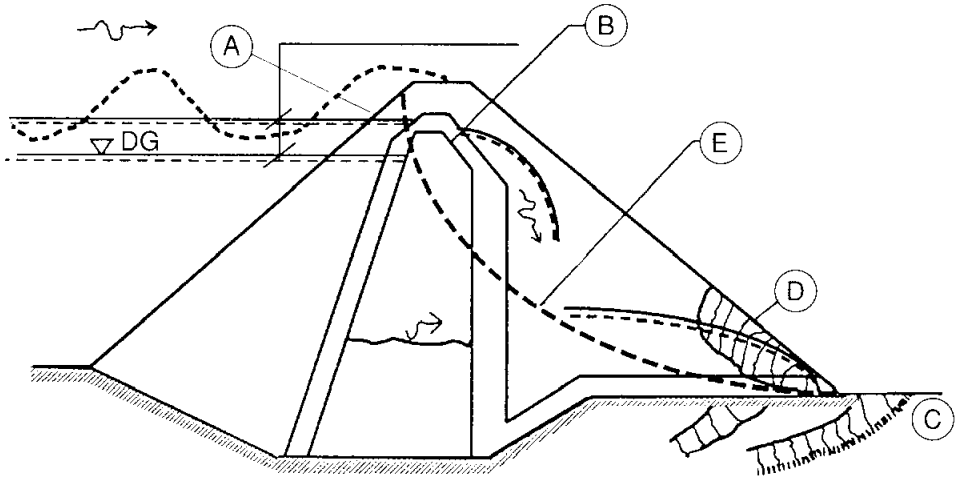
I botten på foderröret kan vidare göras sonderingar för att bestämma jordens fasthet, som beskrivits ovan i avsnitt 5.3.

När borrningen avslutats till fullt djup kan vattenståndsrör installeras t ex på nivåer där lösa lager eller där grovt material påträffats vid borrningen. Olika typer av vattenståndsrör och portrycksmätare har ovan beskrivits i avsnitt 3.2.4. Då endast relativt långsamma förändringar är att förvänta i vattentrycken och magasinet oftast varierar relativt sakta efter den första dämningen, kan det vara tillräckligt att installera öppna vattenståndsrör även i en tätkärna. Rördiametern bör dock vara liten, så att relativt liten vattenmängd erfordras vid tryckförändringar. För att minska inställningstiden kan vattenståndsrör väljas där filterspetsen är förbunden med en tunn plastslang, som dras upp inne i ett stålrör till dammkrönet. Mätning av vattenståndet görs då genom att föra ner en elektrisk ledare i plaströret. Filterspetsen omges vid installationen med filtersand. Foderröret från borrningen dras upp med successiv återfyllning av tätt material (t ex sand blandad med bentonit). Härigenom förhindras att hålet från borrningen blir mer genomsläppligt än omgivande material vilket skulle leda till osäkerhet i vattentrycksbestämningarna.

6. UNDERSÖKNING AV ÖVERDÄMNINGSFÖRMÅGA

6.1. Problemorientering

Tekniska möjligheter till säker överdämning mot fyllningsdammar har utretts av VASO dammkommitté i /21/. Vid överdämning kan uppstå kritiska effekter, som är beroende av överdämningens storlek och dammens konstruktion samt kondition. Vid flertalet anläggningar finns dock följande gemensamma tänkbara skadetyper:



A) Ytlig erosion i dammens uppströmsslänt och krön
B) Läckage och inre erosion i dammkrönet
C) Inre erosion i dammkroppen eller undergrunden
D) Erosion vid dammtån
E) Stabilitet hos nedströmsslänten

Figur 6.1. Skadetyper vid överdämning.

6.2. Undersökningsmetoder

Vid bestämning av den högsta nivå som vattenytan kan få stiga behöver hänsyn tas till dammens konstruktion och skick. Erforderliga undersökningar blir beroende av tillgänglig dokumentation över dammen och dammsäkerhetsbedömningar utförda i samband med besiktningar etc. I de fall där överdämning kan bli aktuell för att avbörda dimensionerande flöde, bedöms det rimligt att utföra en fördjupad dammsäkerhetsutvärdering, som ovan beskrivits i avsnitt 2.3.

Mängden faktorer som påverkar förmågan till överdämning gör att några generella regler inte kan ställas upp, utan behovet av erforderlig kompletterande information behöver bedömas i varje enskilt fall. Programmet för undersökningar i fält för att speciellt bedöma överdämningsförmågan förutses dock kunna omfatta följande punkter:

- Provgropsgrävning i dammkrönet för bestämning av nivåer och genomsläpplighet samt erosionskänslighet för ingående material i dammkrönet: Om dammkrönet eller tät-

kärnan enligt byggnadsritningarna (eller från observationer vid besiktning) har en lågpunkt (t ex vid anslutning till utskov) bör en av provgroparna förläggas där. I annat fall kan groparna fördelas med centrumavstånd i storleksordning 100 à 200 m, dock minst två gropar per damm. Om större avvikelser i nivå av t ex tätkärnans överyta kan befaras mellan provgroparna längs krönet kan groparnas antal ökas eller bestämning göras av tätkärnans krön med hjälp av markradar.

- Då endast nivån för tätkärnans överyta behöver bestämmas kan borrning där borrkronan skär allt material inom diametern för hålet (typ brunnsborraggregat) vara en rationell metod. Genom att observera uppblåst material har det visat sig att tätkärnans överyta i borrpunkten många gånger kan fastställas med god noggrannhet (±5 cm).

- Kornfördelningen uppskattas i överliggande eventuella grova material. Vidare bestäms genom provtagning och siktning kornfördelning hos finkornigare material. Nedströmsfiltrets kornfördelning bestäms genom totalsiktning. Vidare bestäms kornfördelningen och vattenkvoten hos materialet i tätkärnan. Inmätning görs av nivåer för olika materiallager.

- Lokalisering i fält och eventuell kartering genom inmätning av utströmningspunkter längs nedströms dammtå.

- Provgropsgrävning i nedströms dammtå för bestämning av materialets erosionsmotstånd. Groparna placeras i lågpunkter längs dammtån där utläckning kan förväntas. Normalt behövs bestämning av kornfördelningen genom totalsiktning av prov från bankmaterialet och från eventuellt jordmaterial i undergrunden.

- Fotografering och beskrivning av materialen samt andra iakttagelser.

Ovanstående skisserade fältprogram för att utvärdera överdämningsförmågan avser att ge en indikation på omfattningen av en fältundersökning som tillsammans med tillgänglig övrig dokumentation över dammen bör kunna ge underlag för att bedöma ovan listade skaderisker. För dammar där dammbrottskonsekvenserna är stora förutses att kompletterande undersökningar bedöms vara nödvändiga, t ex genom ytterligare undersökningar av samma typ eller med hjälp av andra undersökningsmetoder. I andra fall, där kunskapen redan är stor eller där endast en översiktlig bedömning behöver göras, kan undersökningarna troligen minskas.

7. REFERENSER

/1/ *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar.* Slutrapport från Flödeskommittén. Stockholm i maj 1990.

/2/ *Nya metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar,* VASO- projekt 1995.

/3/ *Anvisningar beträffande kontroll av dammbyggnaders underhåll och säkerhet,* VAST Maj 1990.

/4/ *Dammsäkerhet: Drift, tillsyn och underhåll av dammanläggningar,* Vattenfall, SV- Föreskrift PUS-005:1, 1989-09-25.

/5/ *Automated Observation for Safety Control of Dams,* ICOLD Bulletin 41, 1982.

/6/ *Instrumentering och mätningar för fyllningsdammar,* Delrapport, Allmän översikt, Vattenfall FUD-Rapport U 1990/30, 1990-04-30.

/7/ *Instrumentering och mätningar för fyllningsdammar,* Delrapport, Redovisning av praktikfall m m, Vattenfall FUD-Rapport U 1990/29, 1990-04-30.

/8/ ISO Standard 1438/1 *Water flow measurement in open channels using weirs and ventur*: flumes - Part 1: Thin-plate weirs.

/9/ *Mätning av avloppsvattenflöde i ledningsnät, avloppspumpstationer och fasta mätanordningar,* KTH, Inst för vattenbyggnad, Bulletin No. TRITA-VBI-116, 1982.

/10/ *Discharge Measurement Structures.* Delft Hydraulic Laboratorics. Publication No. 161, May 1976.

/11/ *Jord- och Stenfyllningsdammar,* Handbok, Vattenfall, 1989.

/12/ *Recent Development in Geotechnical Engineering for Hydro Projects.* Embank ment Dam Instrumentation Performance, Proceeding ASCE 1981.

/13/ *Övervakningssystem - Släntbeteende - Skredinitiering.* Resultat från ett fullskaleförsök i Norrköping, Björn Möller och Helen Åhnberg, Statens Geotekniska Institut, Rapport No. 41, Linköping 1992.

/14/ *Åldringstendenser i fyllningsdammar,* Förstudie, Åke Nilsson, Urban Norstedt, Vattenfall, rapport H 1992/6, 1992-12-14.

/15/ *Evaluation of Ageing Processes in Two Swedish Dams,* Nilsson, Å., Norstedt, U. Q.65, R.2, ICOLD Vienna, 1991.

/16/ *Hydraulisk uppspräckning - Delrapport,* Nilsson, Å., Norstedt, U., Vattenfall FUD- Rapport U 1991/22, 1991-02-28.

/17/ *Jordegenskaper ur sonderingsresultat - En jämförelse mellan olika undersökningsmetoder i friktionsjord,* Berghdahl, U., Ottosson, E. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping 1984.

/18/ *Cone Penetration Testing in stiff Glacial Soils using a downhole Cone Penetrometer,* Canadian Geotechnical Journal, 329, page 448-455, 1992.

/19/ *Embankment Dam Cracking. Embankment Dam Engineering,* Casagrane Volume, Sherard, J.L. page 328-337, 1972.

/20/ *Guide to Site Investigation,* Geoguide 2, Geotechnical Control Office, Civil Engineering Services Department, Hong Kong, 1987.

/21/ *Tekniska möjligheter till säker överdämning mot fyllningsdammar.* VASO-projekt 1995.

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

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

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

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

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